

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO**

**“FACULTAD DE ECOLOGÍA”**

**ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA SANITARIA**

**DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS AMBIENTALES**



**“APLICACIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL CON MACROFITAS FLOTANTES  
EN LA RECUPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS,  
MOYOBAMBA – SAN MARTÍN”**

**TESIS**

**Para obtener el título profesional de:**

**INGENIERO SANITARIO**

**Autor**

**MELISSA FLORES SALDAÑA**

**Asesor**

**Ing. MSc. YRWIN FRANCISCO AZABACHE LIZA**

**MOYOBAMBA, DICIEMBRE DEL 2014**

**Código N° 06051314**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO**

**“FACULTAD DE ECOLOGÍA”**

**ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA SANITARIA**

**DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS AMBIENTALES**



**“APLICACIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL CON MACROFITAS FLOTANTES  
EN LA RECUPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS,  
MOYOBAMBA – SAN MARTÍN”**

**TESIS**

**Para obtener el título profesional de:**

**INGENIERO SANITARIO**

**Autor**

**MELISSA FLORES SALDAÑA**

**Asesor**

**Ing. MSc. YRWIN FRANCISCO AZABACHE LIZA**

**MOYOBAMBA, DICIEMBRE DEL 2014**

**Código N° 06051314**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTIN  
FACULTAD DE ECOLOGIA  
Escuela Académica Profesional de Ingeniería Sanitaria

**ACTA DE SUSTENTACION PARA OBTENER EL TITULO**  
**PROFESIONAL DE INGENIERO SANITARIO**

En la sala de conferencia de la Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín-T sede Moyobamba y siendo las **Diez de la Mañana del día Viernes 06 de Marzo del Dos Mil Quince**, se reunió el Jurado de Tesis integrado por:

**Blgo. M.Sc. ASTRIHT RUIZ RÍOS**  
**Ing. RUBÉN RUIZ VALLES**  
**Blgo. ALFREDO IBAN DÍAZ VISITACIÓN**

**PRESIDENTE**  
**SECRETARIO**  
**MIEMBRO**

**Ing. M.Sc. YRWIN FRANCISCO AZABACHE LIZA**

**ASESOR**

Para evaluar la Sustentación de la Tesis Titulado **“APLICACIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL CON MACROFITAS FLOTANTES EN LA RECUPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, MOYOBAMBA - SAN MARTÍN”**; presentado por la Bachiller en Ingeniería Sanitaria **MELISSA FLORES SALDAÑA**, según **Resolución Consejo de Facultad N° 0054-2014- UNSM-T-FE-CF** de fecha **30 de Mayo del 2014**.

Los señores miembros del Jurado, después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas formuladas y terminada la réplica; luego de debatir entre sí, reservada y libremente lo declaran: **APROBADO** por **UNANIMIDAD** con el calificativo de: **MUY BUENO** y nota **DIECISEIS ( 16 )**.

En fe de la cual se firma la presente acta, siendo las **Once y cuarenta** horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el presente acto de sustentación.

**Blgo. M.Sc. Astriht Ruiz Ríos**  
Presidente

**Ing. Rubén Ruiz Valles**  
Secretario

**Blgo. Alfredo Iban Díaz Visitación**  
Miembro

**Ing. MSc. Yrwin Francisco Azabache Liza**  
Asesor

## **DEDICATORIA**

A mis padres, José y Dolibeth, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación, siendo mi apoyo en todo momento, depositando su confianza en cada reto que se me presenta sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Los amo...

A mis hermanos, Massiel y Cristian, por ser parte importante de mi vida, por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos.

A mis abuelitas: Olinda, que aunque ya no este conmigo siempre me ha demostrado su amor infinito y me ha enseñado el valor de la humildad; y Maura, que con su experiencia de vida me ha enseñado a tener fortaleza para asumir cada reto que se me presente.

A Alberth, por su apoyo durante esta etapa de mi vida.

A Dios, por permitirme realizar mis sueños, por mis logros y fracasos, y por la sabiduría para enfrentar los retos de la vida.

***Melissa Flores Saldaña***

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional de San Martín, por darme la oportunidad de realizar mi formación profesional dentro de sus aulas, permitiendo así mi superación académica y personal.

A la Oficina de Investigación y Desarrollo de la UNSM-T, por el financiamiento a la presente investigación.

A mi asesor de tesis Ing. MSc. Yrwin Francisco Azabache Liza, por el apoyo en la realización de este trabajo y por las aportaciones brindadas.

Al Blgo. MSc. Alfredo Díaz Visitación, por sus observaciones y recomendaciones brindadas durante el desarrollo de la investigación.

Al señor Augusto Flores, por su apoyo incondicional durante la etapa de ejecución de la tesis.

A mis padres José y Dolibeth, porque siempre han estado ahí ayudando a forjar mi formación personal y profesional.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE CUADROS .....	vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	vii
ÍNDICE DE FOTOS .....	viii
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	x

### CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema.....	01
1.2 Objetivos .....	02
1.2.1 General.....	02
1.2.2 Específicos .....	02
1.3 Fundamentación Teórica.....	03
1.3.1 Antecedentes de la investigación .....	03
1.3.2 Bases teóricas .....	06
1.3.3 Definición de términos .....	27
1.4 Variables .....	29
1.4.1 Variable Independiente .....	29
1.4.2 Variable Dependiente .....	29
1.5 Hipótesis .....	29

### CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

2.1 Tipo de investigación .....	30
2.1.1 De acuerdo a la orientación .....	30
2.1.2 De acuerdo a la técnica de contrastación .....	30
2.2 Diseño de investigación .....	30
2.3 Población y muestra .....	31
2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	31

2.5 Técnica de procesamiento y análisis de datos .....	40
 CAPÍTULO III: RESULTADOS	
3.1 Resultados.....	41
3.1.1 Análisis de los principales parámetros del ARD .....	41
3.1.2 Evaluación de la eficiencia aplicando la especie <i>Eichhornia crassipes</i> .....	48
3.1.3 Comparación del efluente del humedal con los LMP .....	56
3.2 Discusiones .....	60
3.3 Conclusiones.....	63
3.4 Recomendaciones .....	64
 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	 65
 ANEXOS	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 01: Esquema de clasificación de los sistemas de depuración .....	13
Figura N° 02: Humedal artificial de flujo superficial .....	14
Figura N° 03: Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal .....	15
Figura N° 04: Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical .....	15
Figura N° 05: Morfología de <i>Eichhornia crassipes</i> .....	24
Figura N° 06: Jacintos de agua .....	26
Figura N° 07: Materiales empleados en la construcción de humedales .....	34



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 01: LMP para efluentes de PTAR .....	27
Cuadro N° 02: Tiempo de llenado del balde .....	32
Cuadro N° 03: Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos .....	39
Cuadro N° 04: Análisis de parámetros – Primer mes .....	41
Cuadro N° 05: Análisis de parámetros – Segundo mes.....	42
Cuadro N° 06: Análisis de parámetros – Tercer mes .....	43
Cuadro N° 07: Análisis de parámetros – Cuarto mes.....	44
Cuadro N° 08: Análisis de parámetros – Primer mes .....	45
Cuadro N° 09: Análisis de parámetros – Segundo mes.....	46
Cuadro N° 10: Análisis de parámetros – Tercer mes .....	47
Cuadro N° 11: Análisis de parámetros – Cuarto mes.....	48
Cuadro N° 12: Eficiencia del humedal a 20 cm de profundidad .....	49
Cuadro N° 13: Eficiencia del humedal a 60 cm de profundidad .....	53
Cuadro N° 14: Comparación del efluente del humedal con los LMP a 20cm.....	57
Cuadro N° 15: Comparación del efluente del humedal con los LMP a 60cm.....	58

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 01: Remoción de turbiedad .....	49
Gráfico N° 02: Remoción de sólidos suspendidos totales .....	50
Gráfico N° 03: Remoción de DBO <sub>5</sub> .....	51
Gráfico N° 04: Remoción de coliformes fecales .....	52
Gráfico N° 05: Remoción de turbiedad .....	53
Gráfico N° 06: Remoción de sólidos suspendidos totales .....	54
Gráfico N° 07: Remoción de DBO <sub>5</sub> .....	55
Gráfico N° 08: Remoción de coliformes fecales .....	56

## ÍNDICE DE FOTOS

- Foto N° 01: Limpieza del terreno
- Foto N° 02: Excavación de zanja
- Foto N° 03: Materiales de construcción (arena y hormigón)
- Foto N° 04: Preparación del concreto para el solado
- Foto N° 05: Llenado de la zanja con concreto
- Foto N° 06: Verificación del solado
- Foto N° 07: Pulido y acabado del solado
- Foto N° 08: Asentado de la primera fila de ladrillos
- Foto N° 09: Vista general del asentado de ladrillos de la primera fila
- Foto N° 10: Asentado de ladrillos hasta una altura de 0.7m de altura
- Foto N° 11: Impermeabilización del área interna del humedal artificial
- Foto N° 12: Pulido y acabado final del humedal
- Foto N° 13: Construcción y acabado de la caja de registro
- Foto N° 14: Instalación de tuberías de 4" de PVC
- Foto N° 15: Conexión de tubería de entrada al humedal artificial
- Foto N° 16: Empalme de tubería de salida de 2" a la caja de registro
- Foto N° 17: Llenado del filtro de grava y arena en el fondo del humedal
- Foto N° 18: Recolección de los jacintos de agua
- Foto N° 19: Siembra de los jacintos en el humedal artificial
- Foto N° 20: Reemplazo de brotes con raíces y hojas más grandes
- Foto N° 21: Primer punto de muestreo tomado a la entrada del humedal artificial
- Foto N° 22: Segundo punto de muestreo tomado en el centro del humedal artificial
- Foto N° 23: Tercer punto de muestreo tomado a la salida superior del humedal
- Foto N° 24: Cuarto punto de muestreo tomado a la salida del humedal (por filtración)
- Foto N° 25: Presentación de las muestras en envases rotulados
- Foto N° 26: Limpieza y control de los jacintos de agua
- Foto N° 27: Medición del pH en el laboratorio
- Foto N° 28: Medición de la turbiedad del agua residual
- Foto N° 29: Filtración por membrana para determinar coliformes fecales

## RESUMEN

La aplicación de humedales artificiales en la recuperación de las aguas residuales domésticas, resulta una alternativa económicamente rentable y amigable con el medio ambiente, el uso de la especie *Eichhornia crassipes* y el medio de soporte en el humedal artificial logran una alta eficiencia de remoción de contaminantes.

La investigación parte con la construcción del humedal artificial ubicado en la Urbanización Las Flores, con un caudal de diseño de 25.92 m<sup>3</sup>/día, las dimensiones son de 1.1 m de ancho, 3.3 m de largo y 0.7 m de profundidad, la relación largo: ancho es de 3:1, la impermeabilización de la celda se hizo con ladrillo y concreto.

El comportamiento de la *Eichhornia crassipes* se asocia a la facultad que poseen sus raíces de crear una comunidad bacteriana que metaboliza el nitrógeno y el carbono orgánico, esta característica facilita la eliminación de contaminantes en el agua residual, la eficiencia de remoción a 20 cm de profundidad para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) llega a 84%, en caso de los coliformes fecales la eficiencia alcanza el 82% y para los sólidos suspendidos totales (SST) la eficiencia es de 56%.

El medio de soporte de grava y arena está dividido en tres capas de material filtrante de diferente diámetro, el sustrato es un medio para el crecimiento de microorganismos y regulador de la conductividad hidráulica del agua residual, a 60 cm de profundidad el porcentaje de remoción del DBO<sub>5</sub> llega al 90%, los coliformes fecales logran removerse hasta un 89.84% y los SST supera una eficiencia de remoción del 84%.

El uso de humedales artificiales en la recuperación de las aguas residuales domésticas, es de reciente desarrollo y su eficiencia depende de una buena operación y mantenimiento, siempre teniendo consideración con las especificaciones técnicas e hidráulicas de diseño que plantea la ingeniería sanitaria, resultando ser una alternativa viable y amigable con el ambiente para ser aplicada en nuestra Región San Martín.

## ABSTRACT

The application of artificial wetlands in the domestic wastewater recovery, it is an economically viable alternative and environmentally friendly, the use of the species *Eichhornia crassipes* and the way of support in the artificial wetland achieve a high efficiency of pollutants removal.

The research starts with the construction of the artificial wetland located in The flowers urbanization, with a design flow of 25.92 m<sup>3</sup>/day, the dimensions are 1.1 m in width, 3.3 m long and 0.7 m depth, the relationship long: width is 3:1, the waterproofing of the cell is made with brick and concrete.

The behavior of the *Eichhornia crassipes* associates to the faculty that his roots possess to create a bacterial community that metabolizes the nitrogen and the organic carbon, this feature facilitates the elimination of pollutants in the waste water, the removal efficiency at 20 cm depth for the Biochemical Oxygen Demand (BOD<sub>5</sub>) reaches 84 %, in case of fecal coliforms efficiency reaches 82% and for the total suspended solids (SST) the efficiency is 56 %.

The way of gravel support and sand is divided in three caps of filtering material of different diameter, the substratum is a way for the growth of microorganisms and regulator of the hydraulic conductivity of the residual water, at 60 cm depth the percentage for the removal of BOD<sub>5</sub> reaches 90 %, the fecal coliforms are unable be removed until a 89.84 % and the SST exceeds a removal efficiency of 84 %.

The use of wetlands in the recovery of domestic wastewater, is of recent development and its efficiency depends on a good operation and maintenance, always taking into consideration with the technical specifications and hydraulic design that raises the sanitary engineering, proving to be a viable alternative and environmentally friendly to be applied in our Region San Martin.

**Key words:** sanitary engineering, artificial wetlands.

## **CAPITULO I:**

### **EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1 Planteamiento del problema**

A nivel mundial, la población enfrenta una gran problemática referente al tema de saneamiento, la inadecuada evacuación de las aguas residuales, es un tema de preocupación debido al impacto que genera en el ambiente y en la población. Si bien es cierto, los esfuerzos para minimizar los efectos que causan esas aguas ya están siendo aplicadas en casi toda las regiones del mundo, aún no es suficiente para disminuir la contaminación de los ecosistemas y el deterioro de la calidad de vida de la población.

En el Perú, esta situación no es ajena a nuestra realidad, pues los sistemas de tratamiento para aguas residuales solo se aplican en algunas ciudades del país. Del total de 143 plantas de tratamiento de aguas residuales operativas en el Perú, son muy pocos los proyectos a los que se les puede denominar exitosos.

Hablar de nuestra región San Martín, es mucho más preocupante, ya que la aplicación de un adecuado sistema de tratamiento de aguas residuales resulta muy limitado, un sector de la región no cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de uso doméstico, otras están a nivel de ejecución, algunas ya cuentan con una PTAR pero aún no están operativas; y en el resto de la región las PTAR ya no están en funcionamiento, pues los sistemas han colapsado debido al mal manejo de su operación y mantenimiento.

En la Provincia de Moyobamba, aún no se cuenta con un sistema de tratamiento para las aguas residuales, estas se descargan sin ningún tratamiento en el río Mayo, y en otras zonas de la ciudad se descargan directo a los barrancos como el caso de la Urbanización Las Flores, ocasionando así, contaminación de los cuerpos receptores, del recurso hídrico y del medio físico.

Es por ello, que analizando esta problemática, se plantea solucionarlo mediante un sistema de tratamiento de aguas residuales que sea factible realizarlo,

económicamente rentable y que no demande un problema en la operación y mantenimiento del sistema. Frente a ello se plantea el diseño y construcción de un humedal artificial que tiene por función depurar las aguas residuales de uso doméstico.

Ante esto se formula la siguiente pregunta: ¿En qué medida aplicando el humedal artificial con la especie *Eichhornia crassipes* se puede recuperar las aguas residuales domésticas?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1. General:**

Aplicar el humedal artificial con macrofitas flotantes para recuperar aguas residuales domésticas.

### **1.2.2. Específicos:**

- a) Analizar los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Temperatura, pH, Turbiedad, Sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub> y Coliformes fecales) de las aguas residuales domésticas.
- b) Evaluar la eficiencia del humedal artificial aplicando la especie *Eichhornia crassipes*.
- c) Comparar los valores del efluente del humedal artificial con los valores de los Límites Máximos Permisibles para efluentes de Planta de tratamiento de aguas residuales.

## **1.3 Fundamentación teórica**

### **1.3.1 Antecedentes de la investigación**

- a) Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Jaime Andrés Lara Borrero. Barcelona, mayo 1999.

Los humedales artificiales son una tecnología viable para la depuración de las aguas residuales, especialmente si estas son de origen urbano, y puede llegar a tener un gran futuro en países en vías de desarrollo que tengan climas tropicales o subtropicales, donde las condiciones económicas de estos proyectos (necesidades de terreno, costos de instalación, operación y mantenimiento), pueden ser determinantes a la hora de emprender la depuración de las aguas residuales, si a este punto adicionamos las condiciones climáticas que favorecerían los rendimientos, tendríamos una interesante posibilidad de solución.

- b) Monografía sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para Remoción de Metales Pesados en Aguas Residuales. Islena Yineth Estrada Gallego. Pereira-Colombia 2010.

Los HAFSS aunque pueden ser más costosos en cuanto a medio granular de relleno frente a los HAFS (humedal artificial de flujo superficial), poseen la gran ventaja de protección de la vegetación a factores externos como bajas de temperatura que puede reducir el proceso de degradación de metales por los microorganismos presentes en el medio, por ello las tasas de reacción microbiana pueden ser mayores en estos humedales, lo que es una ventaja también en el tiempo utilizado en el tratamiento.

- c) Tratamiento de Aguas Residuales por un Sistema Piloto de Humedales Artificiales: Evaluación de la Remoción de la Carga Orgánica. Mariana Romero Aguilar, Arturo Colín Cruz. Cuernavaca-México, 2009.

El establecimiento de bacterias en el sistema, tanto en el sustrato como en las raíces de las plantas, ayuda a la remoción de la carga orgánica y de los nutrientes del agua residual que está bajo tratamiento. Los microorganismos son la parte principal del funcionamiento de los



humedales artificiales, ya que de estos depende la eficiencia en la remoción de los contaminantes. Los compuestos orgánicos, nitrogenados y fosforados son transformados a formas más simples y por lo tanto, más fáciles de eliminar del sistema. Es indudable que los humedales artificiales son ecosistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de aguas residuales de una manera segura, confiable, estética y económica.

- d) Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del parque nacional natural Amacayacu – Amazonas. Diego García y Dianna Leal. Bogotá – Colombia, 2006.

El desarrollo del humedal artificial con plantas flotantes, comprendió la selección de plantas acuáticas, pre-experimentación, diseño, construcción, puesta en marcha y funcionamiento del mismo, alcanzando finalmente una eficiencia en remoción del 63% en DBO con posibilidades de presentarse valores superiores, siempre y cuando se sigan las indicaciones de manejo del humedal propuestas. Con esto se mitigará la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes Yewaé.

- e) Adaptación de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad Urbana de Lacabamba, usando Tecnología de Humedales Artificiales. Daniel Lovera, Lawrence Quipuzco, Gaudencio Laureano. Región Ancash-Perú, 2006.

La implementación del sistema de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en pequeñas comunidades de zonas andinas, constituye una innovación tecnológica en el Perú. Los resultados obtenidos de este proyecto determinan que el desarrollo y propagación del carrizo en el humedal artificial fue lenta después de tres meses de sembrado, con un incompleto desarrollo radicular en el suelo. La remoción del fosforo en el humedal se debió principalmente por una buena capacidad de absorción del medio filtrante. Es recomendable realizar

monitoreos periódicos de los parámetros de los contaminantes para analizar la efectividad del tratamiento del humedal en Lacabamba.

- f) Diseño y evaluación de la implementación de un humedal artificial como sistema de tratamiento de las aguas residuales del colegio “Toni Real Vincens” en el AAHH El Milagro-Huanchaco. Blanca Villafranca M. La Libertad-Perú, 2009.

Para la ejecución del humedal artificial se utilizaron dos especies vegetales comunes en la zona, la totora (*Scirpus californica*) y el paraguaita (*Cyperus alternifolius*), porque ayuda a evitar olores desagradables y presencia de vectores (zancudos u otros). Adicionalmente el humedal genera una vista agradable al convertirse también en un área verde. Los beneficios encontrados, fueron el sembrado de más de 200 árboles regados con el desagüe tratado, reduciéndose el uso de agua potable y el costo asociado. Las condiciones del entorno mejoraron en el centro educativo, generándose un ambiente más agradable para los niños. Las aguas residuales tratadas provenientes del humedal artificial, son impulsadas a un tanque elevado mediante una bomba manual.

- g) Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Wilmer Alberto Llagas Chafloque, Enrique Guadalupe Gómez. Lima-Perú, 2006.

La dimensión de las celdas para el diseño del humedal en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos está en la relación largo: ancho (4:1); relación influenciada fuertemente por el régimen hidráulico y la resistencia al flujo dentro del sistema. El flujo a través del humedal tiene que vencer la resistencia a la fricción impuesta por la vegetación y la capa de residuos, la energía para superar esta resistencia es suministrada por el caudal calculado entre la entrada y la salida del humedal. El agua proveniente de este humedal será usada en los servicios de riego de las áreas verdes como: jardines, Estadio Universitario, áreas externas y áreas destinadas al servicio de limpieza de la Ciudad Universitaria.

## **1.3.2 Bases teóricas**

### **1.3.2.1 Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas:**

Las aguas residuales son las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introduce en las cloacas y son transportados mediante el sistema de alcantarillado. En general, se consideran aguas residuales domésticas (ARD), los líquidos provenientes de las viviendas, edificios comerciales e institucionales. (Romero, 2001).

El tratamiento de las aguas residuales es el conjunto de recursos por medio de las cuales es posible verificar las etapas de depuración de un flujo de agua, dentro de un área limitada y bajo condiciones controladas. (Osnaya, 2012).

Las etapas que constituyen un sistema de tratamiento de las aguas residuales se pueden clasificar de manera general en: tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

#### **A. Tratamiento Preliminar:**

Esta etapa no afecta a la materia orgánica contenida en el agua residual. Se pretende con el pretratamiento la eliminación de materias gruesas, cuerpos gruesos y arenosos cuya presencia en el efluente perturbaría el tratamiento total y el funcionamiento eficiente de las maquinas, equipos e instalaciones de La estación depuradora. (Rossi, 2010).

Los dispositivos generalmente empleados en los tratamientos preliminares son los siguientes: (Muñoz, 2004).

- Desbaste:

El desbaste previo es la obra que se realiza para eliminar del agua los elementos que por su volumen son arrastrados por el agua residual.

- Desarenadores:

Su misión es retirar arenas de hasta un tamaño de 200 micras, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones.

- Desengrasadores:

Todos los desengrasadores constan, en principio de dos zonas, una de desemmulsionado de la grasa mediante inyección de aire y otra de tranquilización, donde las grasa flotan.

## **B. Tratamiento Primario:**

El tratamiento primario consiste principalmente en la remoción de sólidos suspendidos floculentos, mediante sedimentación o floculación, en la neutralización de la acidez o alcalidad excesivas y en la remoción de compuestos inorgánicos mediante precipitación química. (Rossi, 2010).

Entre los principales procesos y operaciones de tratamiento primario están:

- Sedimentación:

Se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido en donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión. (Ramalho, 2005).

- Coagulación y Floculación:

Los procesos de coagulación-floculación facilitan el retiro de los SS y de las partículas coloidales. En ese sentido, se define a la coagulación como la desestabilización de la suspensión coloidal, mientras que la floculación se limita a los fenómenos de

transporte de las partículas coaguladas para provocar colisiones entre ellas promoviendo su aglomeración. (Rossi, 2010).

- Decantación:

En la decantación primaria y secundaria se producen lodos primarios o secundarios. Estos lodos están compuestos por agua y partículas sólidas. El agua se encuentra agregada o como agua capilar. (Rossi, 2010).

### **C. Tratamiento Secundario:**

Tiene como objetivo fundamental la eliminación de materia orgánica biodegradable presente en forma disuelta y coloidal. Tiene lugar a través de un proceso biológico, mediante microorganismos que actúan en condiciones controladas. Consta de dos procesos, uno de naturaleza bioquímica y otra de naturaleza fisicoquímica. (Pérez, 2005)

Para cada tipo de reactor biológico podemos encontrar una variedad de dispositivos utilizados para el tratamiento secundario de las aguas residuales. (Osnaya, 2012).

#### **Sistemas de cultivos suspendidos**

- Lodos activados:

Consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos; tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual debe su nombre de activado. (Romero, 2001).

- Lagunas aireadas:

Son embalses de agua servida que ocupan una gran superficie de terreno, por lo que se emplean cuando éste es un bien barato. El agua servida así dispuesta se oxigena mediante aireadores superficiales o difusores

sumergidos para generar oxidación bacteriana. (Rossi, 2010).

- Lagunas de estabilización:

Son grandes depósitos impermeables, de profundidad variada, a los que se vierten afluentes de aguas residuales. La depuración por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de estas durante un tiempo variable en función a la carga aplicada y de las condiciones climáticas. (Osnaya, 2012).

### **Sistemas de cultivos adheridos**

- Filtros percoladores:

Se trata de un sistema de depuración biológica en el que la degradación de la materia orgánica se produce al hacer circular agua y aire a través de un medio filtrante o poroso. Estos filtros tienen por objetivo reducir la carga orgánica existente en las aguas residuales domésticas. (Pérez, 2005).

- Biotorres:

Son similares a los filtros percoladores, pero las biotorres tienen sus ventajas sobre los filtros percoladores, el empleo de material plástico como soporte disminuye los problemas de obstrucción, requieren menos espacios y pueden operar en condiciones climáticas severas. (Osnaya, 2012).

- Biodiscos:

Son sistemas que fueron desarrollados para obtener el tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales. (Ramalho, 2005).

En los biodiscos los microorganismos no se encuentran suspendidos en el líquido, sino que se encuentran fijos en ambas caras de un soporte (biodisco). (Martínez, 2005).

#### **D. Tratamiento Terciario:**

Los objetivos del tratamiento terciario son eliminar la carga orgánica remanente de un tratamiento secundario, eliminar microorganismos patógenos, eliminar color y olor indeseables, remover detergentes, fosfatos y nitratos residuales, que ocasionan espuma y eutrofización respectivamente. (Rossi, María. 2010).

Existen muchos métodos de tratamiento terciario, algunos de los más importantes son los siguientes:

- Adsorción en carbón activado:

El carbón activado en forma granulado o pulverulento, se trata de un fenómeno de superficie por el que los compuestos a adsorber se fijan sobre el carbón activado por uniones físicas y químicas. (Pérez, 2005)

- Intercambio iónico:

Se produce cuando los iones retenidos a grupos funcionales en una superficie sólida por fuerzas electroestáticas se intercambian con iones de igual carga provenientes de la disolución en la que el sólido está sumergido. (Russell, 2012).

- Osmosis inversa:

Es un proceso donde el flujo natural de un fluido a través de una membrana semipermeable se invierte mediante la aplicación de presión a la disolución concentrada. (Russell, 2012).

- Electrodiálisis:

Es un método prometedor de eliminación de nutrientes inorgánicos (fosforo y nitrógeno) de las aguas residuales. Los componentes básicos de una celda de electrodiálisis son una serie de membranas hechas de resinas de intercambio iónico. (Ramalho, 2005).

- Oxidación química:

También pueden eliminarse compuestos orgánicos, procediéndose a su oxidación con agentes tales como el peróxido de hidrogeno o el ozono, que son poderosos agentes oxidantes debido a sus reacciones de descomposición. (Pérez, 2005).

#### **1.3.2.2 Humedales Artificiales:**

Los humedales artificiales consisten normalmente en un monocultivo o policultivo de plantas superiores (macrofitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales poco profundos. El efluente, normalmente después de recibir un pre-tratamiento, pasa a través del humedal durante el tiempo de retención. La acción de las macrofitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.

El tratamiento de aguas residuales para depuración se lo realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución. (Delgadillo, 2010).

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Lara, 1999).

El término macrofitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos (Fernández, 2004). Constituyen “fitosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la



fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento de las aguas.

### ❖ *Clasificación de los humedales artificiales*

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrofitas que empleen en su funcionamiento: macrofitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrofitas flotantes libres. Considerando la forma de vida de estas macrofitas, los humedales artificiales pueden ser clasificados en: (Delgadillo, 2010).

- Sistemas de tratamiento basados en macrofitas de hojas flotantes:

Principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna* sp.) son las especies más utilizadas para este sistema.

- Sistemas de tratamiento basados en macrofitas sumergidas:

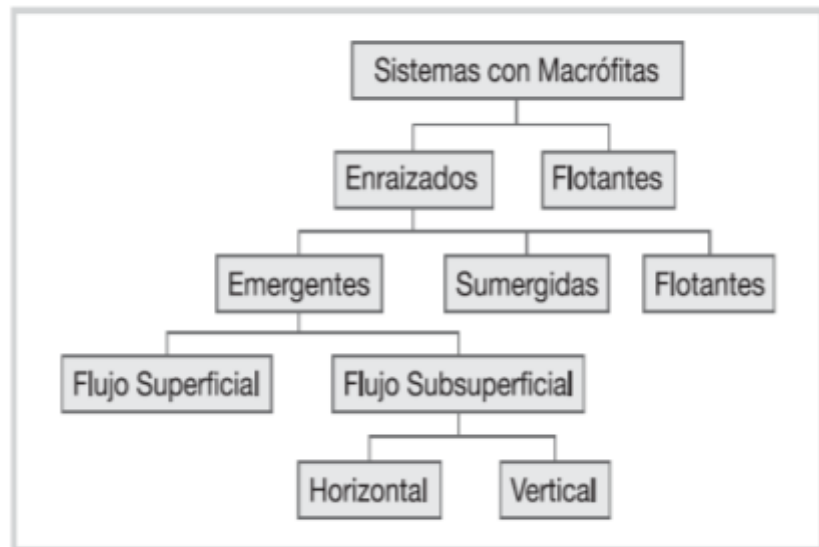
Comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas.

- Sistemas de tratamiento basados en macrofitas enraizadas emergentes:

En suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos.

Figura N° 01:

Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrofitas



❖ *Tipos de humedales artificiales:*

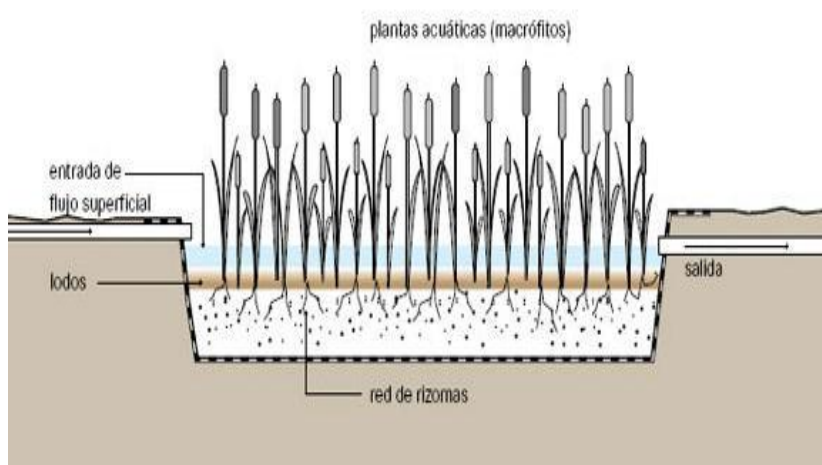
Según la dirección del movimiento del agua a través del humedal se consideran los siguientes tipos: horizontal, vertical, flujo superficial y flujo subsuperficial. (Fernández, 2004)

**A. Humedales artificiales de flujo superficial (FWS)**

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales.

Los sistemas FWS se configuran con una apariencia similar a los humedales naturales. Se diseñan a modo de canales o estanques con paredes ataludadas, en donde éstas y el recubrimiento inferior son estancos (materiales impermeables), canalizaciones de entrada y salida del agua residual, estructuras o dispositivos de control del flujo, y alternancia de áreas con y sin vegetación acuática. (Fernández, 2004)

Figura N° 02:  
Humedal Artificial de flujo superficial



## **B. Humedales de flujo subsuperficial (SsF)**

Los sistemas de flujo subsuperficial se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. (Delgadillo, 2010).

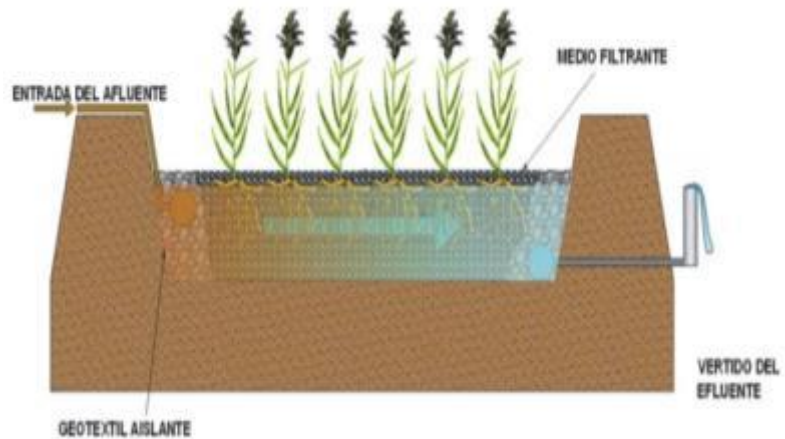
Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos:

### **a) Humedales de flujo subsuperficial horizontal**

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón).

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. (Delgadillo, 2010).

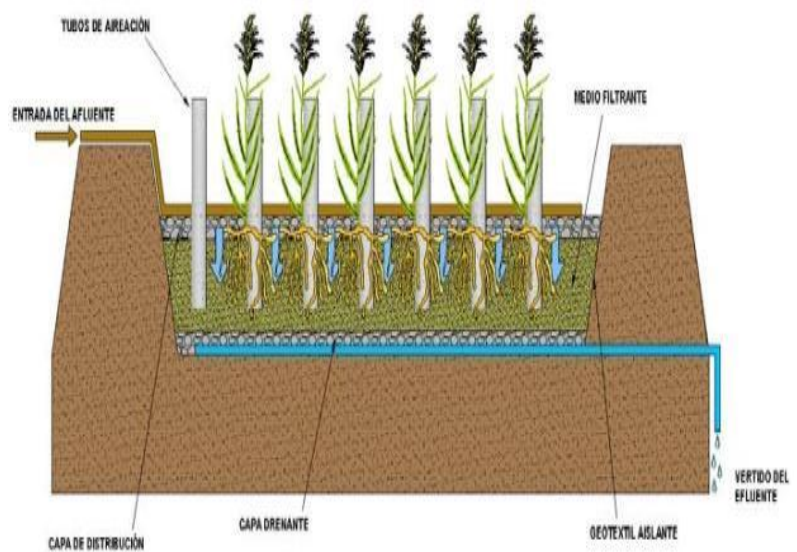
Figura N° 03:  
Humedal Artificial de flujo Subsuperficial Horizontal



b) Humedales de flujo subsuperficial vertical

Las aguas percolan verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas), y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal, que se conecta con chimeneas de aireación. La alimentación al humedal se efectúa de forma intermitente, para preservar al máximo las condiciones aerobias. (García, 2006)

Figura N° 04:  
Humedal Artificial de flujo Subsuperficial Vertical



### ❖ *Mecanismo de remoción de contaminantes*

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tiene lugar. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja. (Delgadillo, 2010).

A continuación se explican los mecanismos de remoción de contaminantes que ocurren en los humedales artificiales:

- Remoción de D.B.O.

Los procesos que conducen a la remoción de la materia orgánica son de dos tipos: físicos y biológicos, ambos estrechamente inter-relacionados. (Fernández, 2004)

La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos. (Delgadillo, 2010).

Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza.

- Remoción de Sólidos Suspendidos Totales

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrofitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal. (Delgadillo, 2010).

La remoción de sólidos suspendidos es muy efectiva en los dos tipos de humedales artificiales, produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 20 mg/L, que es el valor de referencia. (Lara, 1999).

- Remoción de Nitrógeno

Al momento que ingresa agua residual al humedal construido, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. (Delgadillo, 2010).

La remoción de nitrógeno en humedales puede alcanzar valores por encima del 80%.

- Remoción de Coliformes Fecales:

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen, como se mencionó antes, predación y ataque por bacteriófagos y también la muerte.

Finalmente, los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas (aunque la cantidad de estos antibióticos causa dudas respecto a su efectividad para afectar a los patógenos). (Lara, 1999)

### ❖ **Funciones de las macrofitas en los mecanismos de remoción**

Las macrofitas están adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados por agua, porque tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos. Estos sistemas internos les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas. En algunas especies este sistema ocupa más del 60% del volumen total del tejido.

Las macrofitas poseen varias propiedades que hacen de ellas un importante componente de los humedales construidos. Entre estas propiedades, los efectos físicos como la estabilización de la superficie de los humedales construidos y la prevención de taponamientos de la matriz son muy importantes.

El consumo de nutrientes por la planta juega un rol importante y solamente tiene que ser considerado en el caso de cosecha del tejido de la planta. Otro hecho importante, especialmente en climas templados, es la capacidad de aislamiento térmico de las macrofitas. (Delgadillo, 2010).

Por último, las macrofitas pueden proveer hábitat para la vida salvaje y dar una apariencia agradable a los sistemas de tratamiento de aguas residuales, según la especie escogida.

### ❖ **Operación, mantenimiento y control de humedales artificiales:**

- Operación y mantenimiento:

La operación es muy importante si quieren obtenerse buenos resultados. Por tanto, debe contarse con un plan de operación y mantenimiento que debe escribirse durante la etapa de diseño final del sistema. La operación y mantenimiento debe enfocarse a los factores más importantes para el rendimiento del tratamiento: (Lara, 1999)

- Proporcionar una amplia oportunidad para el contacto del agua con la comunidad microbiana, con la capa de residuos de vegetación y con el sedimento.
- Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- Mantener un ambiente saludable para los microbios
- Mantener un crecimiento vigoroso de vegetación.

- Control

La supervisión es una herramienta operacional importante que:

- Proporciona datos para mejorar el rendimiento del tratamiento.
- Identifica problemas.
- Documenta la acumulación de sustancias potencialmente tóxicas antes de que sean bioacumulables.
- Determina el cumplimiento de los requisitos reguladores.

El control necesita medir si el humedal está obteniendo los objetivos y para indicar su integridad biológica. Esta supervisión permite identificar los problemas temprano, cuando la intervención es más eficaz.

El nivel de detalle del control dependerá del tamaño y la complejidad del sistema de humedales y puede cambiar cuando el sistema madura y se conoce mejor su comportamiento. Los sistemas ligeramente cargados que han estado operados satisfactoriamente sólo necesitarían ser verificados una vez al mes y después de cada tormenta importante. Aquellos que están muy cargados requerirán una supervisión más frecuente y detallada.

Los humedales deben controlarse periódicamente para observar las condiciones generales del sitio y para descubrir cambios importantes que puedan ser adversos, como erosión o



crecimiento de vegetación indeseable. Debe supervisarse la vegetación periódicamente para evaluar su salud y abundancia. La vegetación del humedal construido está sujeta a cambios graduales de año en año, así como en los humedales naturales. Puede haber tendencia a que algunas especies mueran y sean reemplazadas por otras. Dado que los cambios vegetativos son a menudo lentos, no son obvios a corto plazo y, por tanto, es esencial mantener buenos registros. (Lara, 1999)

### **1.3.2.3 Macrofitas Utilizadas en Fitodepuración:**

El rasgo que mejor define a los vegetales es el hecho de que son seres vivos fotosintéticos, por lo que su nutrición es de tipo autótrofo. La fotosíntesis les confiere la capacidad de utilizar como fuente de carbono un compuesto inorgánico, el dióxido de carbono, para desarrollarse y así generar materia orgánica; es lo que conforma la denominada producción primaria en el planeta. (Fernández, 2004). El abanico de especies que se utilizan en fitodepuración es más bien reducido, y en general se restringe a especies típicamente helófitas debido a que los sistemas más extendidos son los de flujo superficial y flujo sub-superficial. (Fernández, 2004).

#### **A. Macrofitas Emergentes:**

- Typha spp. (Familia Typhaceae)

La familia de las Typhaceae está formada por un único género, el género Typha, de características morfológicas bastante homogéneas. Se trata de plantas acuáticas helófitas, con sistema radicular arraigado en el fango o fondo del humedal, y estructura vegetativa que emerge por encima de la lámina de agua. (Fernández, 2004).

- *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel (= *P. communis* Trin.)

*Phragmites australis* es una planta acuática perteneciente a la familia de las gramíneas (Poaceae), cuyas características morfológicas recuerdan a la caña común *Arundo donax*, que es una planta terrestre muy conocida. La diferencia más notable entre ambas es la de la condición de planta acuática helófito del carrizo.

- Juncos: *Scirpus* Spp

El género *Scirpus* se encuadra dentro de las Cyperaceae, familia muy próxima botánicamente a las de las gramíneas. En general, el aspecto de las Cyperaceae recuerda al de las gramíneas, ya que en su mayoría son plantas herbáceas, cespitosas, con flores pequeñas, muy reducidas y poco aparentes. (Fernández, 2004).

## **B. Macrofitas Flotantes:**

Aquellos que no se encuentran adheridos al substrato, como: (García, 2009).

- *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua)

El jacinto de agua es una planta acuática flotante no enraizada, herbácea perenne muy común en ambientes acuáticos de climas tropicales, en donde llega a considerarse como planta invasiva; está catalogada como una de las malas hierbas más dañinas a nivel mundial.

- *Lemna* spp. (lentejas de agua)

El nombre común de lenteja de agua se aplica a especies del género *Lemna* y otros géneros (*Spirodela*, *Wolffia*, *Wolffiella*) de la familia de las Lemnaceae, debido a que todas ellas son plantas acuáticas herbáceas flotantes no enraizadas de muy pequeño tamaño: son las plantas más

pequeñas –hay especies de 1 mm de longitud– y de estructura más reducida de todas las angiospermas (plantas con flor). (Fernández, 2004).

### **C. Macrofitas Enraizadas:**

Son Aquellos que se mantienen enraizados al sustrato y tienen hojas, que pueden ser de gran tamaño, que flotan en la superficie, como los nenúfares. (García, 2009).

- **Nuphar luteum**

Planta de raíz rizomatosa. Hojas fuertes de forma plana, ovalada y algo puntiaguda con sus raíces fijas en la tierra y sus hojas flotando en la superficie del agua.

- **Nymphaea alba**

Tiene un rizoma carnoso y horizontal, que se arraiga al fondo del espejo de agua en el que habita. Las hojas flotan, al cabo de largos peciolo; son grandes, cordiformes y bien lobuladas, de textura coriácea y color verde claro.

### **❖ Descripción del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*):**

El jacinto de agua es una planta acuática flotante no enraizada, herbácea perenne muy común en ambientes acuáticos de climas tropicales, en donde llega a considerarse como planta invasiva; está catalogada como una de las malas hierbas más dañinas a nivel mundial. Se la considera originaria de la amazonia, y actualmente está extendida en prácticamente todas las zonas tropicales acuáticas del planeta. Se distingue muy fácilmente de otras plantas flotantes por poseer hojas relucientes con peciolo hinchados y vistosas flores azuladas-lilas. (Fernández, 2004).

- **Nomenclatura:**

La macrofita acuática *Eichhornia crassipes* se encuentra dentro de la siguiente clasificación sistemática:

**Reino :** Plantae.  
**División:** Magnoliophyta.  
**Orden :** Commelinales.  
**Familia :** Pontederiaceae.  
**Género :** *Eichhornia*.  
**Especie :** *E. crassipes*.

- **Morfología:**

El tamaño de la planta varía según su hábitat, algunas investigaciones reportan que la longitud de la planta desde la parte superior de la flor hasta el extremo de las raíces varía entre 0.5 y 1.2 m. Posee raíces sumergidas, carece de tallo aparente, el tallo vegetativo es sumamente corto. Está provista de un rizoma muy particular, emergente, del que se abre un rosetón de hojas, las cuales pueden estar sumergidas lineares y emergidas, de forma ovaladas y redondeadas, con peciolo cortos hinchados (bulbosos) de tejido parenquimatoso con muchas cámaras de aire (más del 70% de sus volumen está ocupado de aire) que facilitan la flotación en la superficie del agua; crecen agrupadas con dimorfismo foliar (Rojas, 2005).

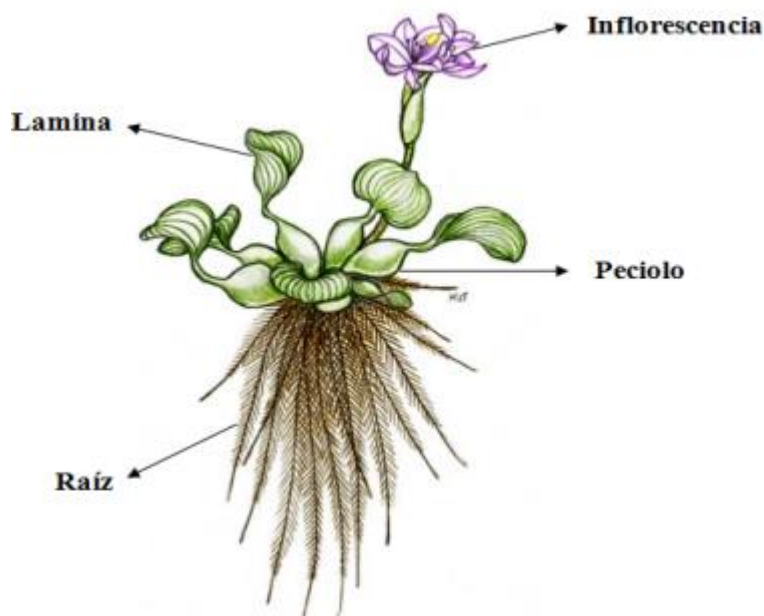
Su inflorescencia es por espigas agrupadas, abiertas, situadas unos 30 cm por encima de las hojas, donde brotan flores lilas y azuladas con una mancha amarilla en el lóbulo superior del perianto; de fruto en cápsula de 1,5 cm aproximadamente.

Las raíces son muy características, pueden ser negras con las extremidades blancas cuando son jóvenes o negro violáceas cuando son adultas. El sistema radicular de esta especie

acuática representa entre un 10 – 48 % del total de la biomasa de la planta, (Rojas, 2005).

Figura N° 05:

Morfología de *Eichhornia crassipes*.



- **Ciclo de desarrollo:**

En su hábitat natural el jacinto de agua es una planta herbácea perenne de rápido desarrollo, que se extiende lateralmente mediante el desarrollo de estolones y formación de renuevos.

La planta se reproduce principalmente por propagación vegetativa, esto es, mediante estolones que radian desde base de la planta y desarrollan renuevos. También puede reproducirse mediante semilla, y de hecho la semilla constituye una fuente de re-infestación cuando se erradica la población.

En climas tropicales la producción de estolones y renuevos es constante. Los estolones son de coloración púrpura violeta, y consisten en una sucesión de nudos y entrenudos; cada nudo puede desarrollar una hoja y raíces; y a partir de yemas axilares de las hojas se desarrollan tallos vegetativos aéreos. (Fernández, 2004).

- **Aplicación:**

En los climas tropicales, la especie muestra una gran adaptabilidad ecológica, desarrollándose bien en estanques temporales, zonas húmedas, marismas, aguas contaminadas, lagos, pantanos y ríos. El principal limitante para el desarrollo del jacinto de agua es la temperatura, que debe mantenerse dentro de los límites usuales del régimen tropical o subtropical. El jacinto de agua se utiliza en sistemas acuáticos de tratamiento de aguas residuales domésticas de climas cálidos, siendo el principal parámetro de diseño la carga orgánica. Su eficacia dependerá del grado de cobertura alcanzado, es decir, de su rendimiento en biomasa. (Fernández, 2004).

- **Técnicas de manejo en los humedales artificiales:**

- ✓ Implantación

La implantación del jacinto de agua en los sistemas acuáticos de tratamiento de aguas se realiza a partir de plantas individuales o renuevos, que se dejan dispersos por la superficie del agua. Estas plantas se obtienen por división de una población madre, individualizándose las agrupaciones de ‘rosetas’ con raíces.

- ✓ Accidentes, plagas y enfermedades

El hecho de que el jacinto de agua esté catalogado a nivel mundial como una de las principales malas hierbas se debe no sólo a sus características de desarrollo (éxito de la propagación vegetativa y alta tasa de crecimiento relativo) sino también a su rusticidad en cuanto a accidentes, plagas y enfermedades. No tiene plagas ni enfermedades importantes, aunque en las zonas en las que el jacinto de agua no es deseable, se ha intentado su control biológico

mediante enemigos naturales importados de su área de distribución natural (coleópteros, lepidópteros y hongos).

✓ Cosecha

La remoción parcial de la población del jacinto de agua, con una cierta periodicidad, es necesaria no sólo para eliminar del sistema los nutrientes captados por las plantas sino también porque cuando sucede la cobertura total de la lámina de agua desciende mucho el oxígeno disuelto en el agua, se interrumpe el paso de la luz y el aporte de materia orgánica en el agua aumenta rápidamente por la pudrición de la biomasa vegetal. A modo de indicación se señala que en climas cálidos debe realizarse la cosecha parcial de las plantas cada 3 o 4 semanas. (Fernández, 2004).

Figura N° 06:

Jacintos de agua (*Eichhornia crassipes*)



#### 1.3.2.4 Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales:

Cuadro N° 01:

LMP para efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NPM/100mL	10,000
D.B.O.	mg/L	100
D.Q.O.	mg/L	200
pH	unidad	6.5 – 8.5
Sólidos totales en suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	< 35

Fuente: LMP para PTAR del MINAM

#### 1.3.3 Definición de términos:

- Aerobios: Se denomina aerobios a los organismos que necesitan del oxígeno diatómico para vivir o a los procesos que lo necesitan para poder desarrollarse. El adjetivo aerobio se aplica no sólo a organismos sino también a los procesos implicados (metabolismo aerobio) y a los ambientes donde se realizan.
- Afluente: Aguas residuales domesticas que ingresan al humedal artificial.
- Anaerobios: Se llama anaerobios a los organismos que no necesitan oxígeno (O<sub>2</sub>) para desarrollarse, a diferencia de los organismos aerobios. Los anteriores pueden dividirse en: los organismos anaerobios forzosos, que mueren en presencia de oxígeno; los organismos anaerobios facultativos, que pueden usar el oxígeno si está presente; y los organismos



aerotolerantes, los cuales pueden vivir en presencia de oxígeno pero no hacen uso de él en forma alguna.

- Coliformes fecales: Se las utiliza como indicador de contaminación microbiológica de las aguas residuales domesticas provenientes de la Urb. Las Flores. Se expresa en UFC/100 ml.
- DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. Medida de la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación del material carbonoso de una muestra de agua, por la población microbiana, a lo largo de cinco días de incubación y a una temperatura de 20 °C.
- Degradación: Es la transformación de los contaminantes presentes en el agua residual en compuestos menos contaminantes debido a la acción depuradora de los jacintos de agua.
- Efluente: Aguas residuales domésticas que salen del humedal artificial.
- Estación depuradora de aguas residuales: Unidad compuesta por instalaciones, estructuras o mecanismos que permitan una depuración por métodos físicos, físico-químicos, microbiológicos o alternativas tecnológicas similares del agua residual.
- Lodo: Residuo de consistencia pastosa, más o menos cargado de agua que proviene de la depuración de aguas residuales. Se caracteriza por contener elevadas concentraciones de materia orgánica.
- Recuperación de aguas residuales: las aguas residuales son aguas contaminadas que al aplicar el tratamiento de humedal artificial estas se recuperan pues disminuye el grado de contaminación, una vez tratadas se pueden reutilizar para riego.

## 1.4 Variables

### 1.4.1 Variable Independiente:

- Humedal Artificial con Jacintos de agua

### 1.4.2 Variable Dependiente:

- Recuperación de las aguas residuales domésticas.

## 1.5 Hipótesis:

- Mediante el humedal artificial utilizando la especie *Eichhornia crassipes* (jacintos de agua) se puede recuperar las aguas residuales domésticas.

## CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO

### 2.1 Tipo de investigación

#### 2.1.1 De acuerdo a la orientación:

- Aplicada.

#### 2.1.2 De acuerdo a la técnica de contrastación:

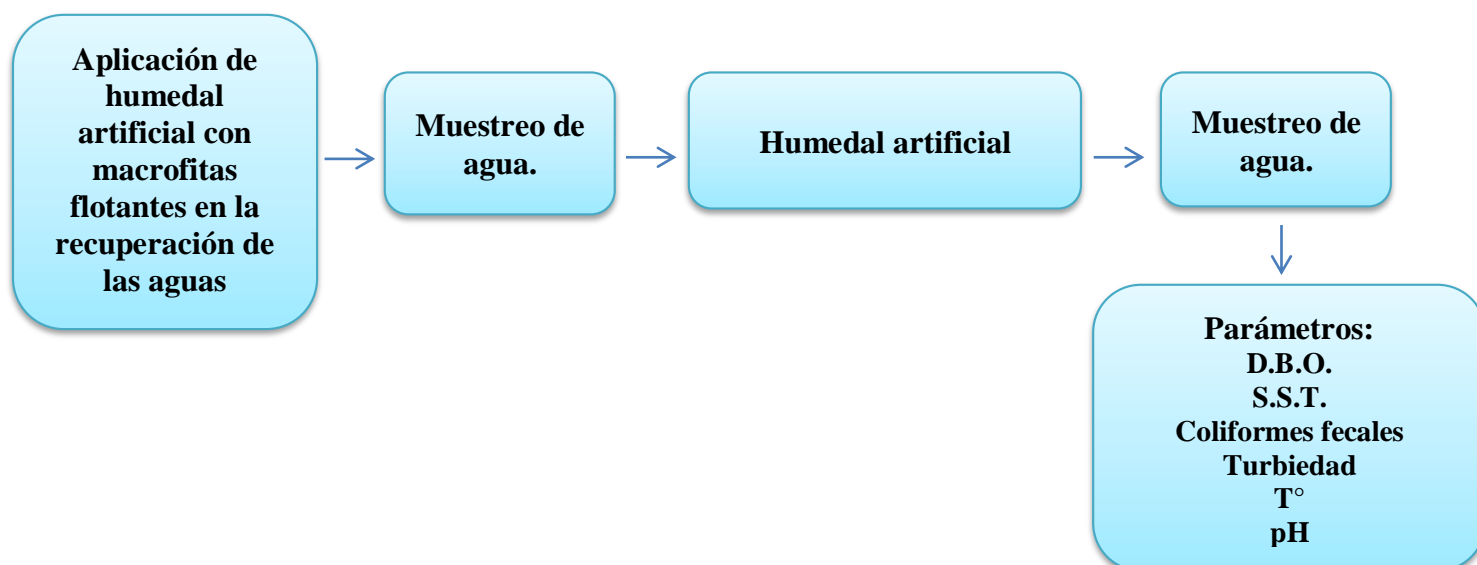
- Explicativa.

### 2.2 Diseño de investigación

Diseño de pre-prueba – post-prueba con un solo grupo

G.E:      O <sub>1</sub> X      O <sub>2</sub>
--

El diseño de la investigación empieza con la caracterización fisicoquímica y microbiológica, el cual se realizó a la entrada del humedal, luego se aplicó el tratamiento para la depuración del agua residual utilizando la especie *Eichhornia crassipes*, después de ello se hizo la caracterización del agua residual a la salida del humedal, la primera a 20 cm y la segunda a 60 cm de profundidad.



## **2.3 Población y muestra**

### **2.3.1 Población:**

Está comprendida por el caudal promedio de entrada al humedal artificial de la Urbanización Las Flores:

$$Q = 25.92 \text{ m}^3/\text{día}$$

### **2.3.2 Muestra:**

- Se realizaron en total 16 muestras de agua residual, cada muestra es de 500 ml, haciendo un total de 8 litros.

## **2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Dependiendo del tipo de investigación a realizar, las técnicas de recolección de información pueden ser de dos formas: la primera es aquella que utiliza la información existente denominada Información Secundaria y la segunda que trabaja con información de primera mano debido a la escasez de información existente acerca de un determinado tema llamada Información Primaria.

### **2.4.1 Técnicas de Recolección de Datos Secundarios:**

#### **➤ Recolección de información:**

Se recurrió a diversas investigaciones realizadas por diversas instituciones a escala local, regional, nacional e internacional para el análisis metodológico y científico del presente estudio.

Dentro de las técnicas utilizadas tenemos: fuentes internas, generadas por instituciones estatales y privadas; publicaciones de gobierno; libros, revistas, tesis, información del internet y datos de las organizaciones mundiales vinculadas al tema.

## 2.4.2 Técnicas de Recolección de Datos Primarios:

### ➤ Selección de sitio:

Para la instalación experimental del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, se seleccionó la Urbanización Las Flores, ubicado en el sector Punta de Doña, esta urbanización se encuentra dentro del casco urbano de la ciudad de Moyobamba.

La Urb. Las Flores cuentan con un padrón de 40 familias, todas estas están conectadas a la red de alcantarillado, sus aguas residuales desembocan en un tanque séptico de dos unidades, después de ello pasan a un pozo percolador para luego descargar aguas abajo. El humedal artificial está ubicado justo en medio de las unidades del tanque séptico y pozo percolador. Todas estas unidades de tratamiento están ubicadas en un barranco situado cerca de la urbanización.

### ➤ Diseño del humedal artificial:

#### • Cálculo del caudal

El primer paso para calcular el dimensionamiento hidráulico del humedal artificial, fue medir el caudal de salida del tanque séptico, para la medición del caudal se aplicó el método volumétrico que consta en dividir el volumen de agua recogido en el depósito por el tiempo (en segundos) que demoró en llenarse. El resultado expresa el caudal medido en litros por segundo. La prueba se realizó en un balde de 4 lt. con tres repeticiones en un lapso de 15 minutos. A continuación se muestra las tres repeticiones del tiempo que demoró en llenarse el balde de 4 lt:

Cuadro N° 02

Tiempo de llenado del balde de 4 lt.

t <sub>1</sub>	12.52 seg.
t <sub>2</sub>	13.37 seg.
t <sub>3</sub>	14.11 seg.
Promedio	13.333 seg.

Fuente: Cuaderno de campo

Para calcular el caudal se aplicó la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

$$Q = 4 \text{ litros} / 13.333 \text{ segundos}$$

$$Q = 0.3 \text{ lt/seg} \approx 25.92 \text{ m}^3/\text{día}$$

- **Cálculo del dimensionamiento hidráulico del humedal artificial**

Para el dimensionamiento hidráulico se tomó como ejemplo las formulas aplicadas en la Guía de depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales de los autores: Delgadillo, Oscar, y otros. 2010.

1. Requerimientos:

$$Q = 25.92 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{DBO} = 110 \text{ mg/L}$$

$$T^\circ = 27^\circ \text{C}$$

$$\text{Condiciones de salida: } \text{DBO}_5 < 37 \text{ mg/L}$$

2. La constantes de reacción de primer orden se calcula mediante:

$$K_T = 1.104 * (1.60)^{27-20}$$

$$K_T = 1.104 * (1.60)^{27-20}$$

$$K_T = 29.64 \text{ d}^{-1}$$

3. Porosidad del medio granular:

Grava fina de 16 mm y Grava media de 32 mm

$$n = 38\% = 0.38 \quad K_s = 10,000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

Figura N° 07:  
Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales artificiales

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, ks (m3/m2/d)	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	100-1.000	28-32
Arena gravosa	8	500-5.000	30-35
Grava fina	16	1.000-10.000	35-38
Grava media	32	10.000-50.000	36-40
Roca gruesa	128	50.000-250.000	38-45

Fuente: Lara, Jaime. 1999

4. La profundidad varia de 0.3 a 1 m:

Asumimos:  $h = 0.70$  m

Nivel de agua a tratar:  $h = 0.55$  m

Borde libre:  $h = 0.15$  m

5. Cálculo del área superficial:

$$As = \frac{Q \times (\ln DBO_{\alpha} - \ln DBO_{\alpha})}{(kt) \times (y) \times (n)}$$

$$As = \frac{25.92 \times (\ln 110 - \ln 37)}{29.64 \times 0.7 \times 0.38}$$

$$As = 3.58 \text{ m}^2$$

6. Para determinar las dimensiones del humedal nos basamos en la relación L: W. Asumimos la relación 3: 1

$$As = L \times W$$

$$A_s = 3W * W$$

$$3.58 \text{ m}^2 = 3W^2$$

$$1.19 = W^2$$

$$1.09 \text{ m} = W$$

Por requerimientos de construcción redondeamos: **W = 1.10 m**

7. Cálculo del largo del humedal artificial:

$$L = \frac{A_s}{W}$$

$$L = 3.58 / 1.09$$

$$L = 3.28 \text{ m}$$

Por requerimientos de construcción redondeamos: **L = 3.30 m**

8. La pendiente varia de 0.1 a 1%:

Asumimos una pendiente de 0.5%

$$S = \frac{m * h}{L}$$

m = pendiente del fondo del lecho, % expresado en decimal

$$S = \frac{(0.5 * 0.55)}{3.33}$$

$$3.33$$

$$S = 0.083 \text{ m/m}$$

9. Cálculo del tiempo de retención hidráulica THR:

$$THR = \frac{A_s * y * n}{Q}$$

$$THR = \frac{3.58 * 0.7 * 0.38}{25.92}$$

$$25.92$$



$$\text{TRH} = 0.037 \text{ día} * 24 \text{ horas}$$

$$\text{TRH} = 0.88 \text{ hora}$$

- **Trazado del dibujo en Autocad**

Una vez hecho el cálculo hidráulico del humedal artificial, se realizó el dibujo del sistema en el programa Autocad, este se hizo con el propósito de tener una visión más clara al momento de la construcción y poder así, cumplir con las especificaciones del diseño. Ver Anexo.

➤ **Construcción del humedal artificial:**

Después de haber realizado el cálculo hidráulico del humedal artificial, se construyó el sistema teniendo en cuenta las dimensiones y los procedimientos constructivos, a continuación detallaré cada actividad realizada:

- Para poder realizar los trabajos de construcción del humedal artificial, se tuvo que hacer limpieza del terreno tanto de la zona de investigación como del área cercana, para tener una mejor accesibilidad al área de trabajo.
- Se procedió a excavar la zanja, con dimensiones de 1.1 m. de ancho, 3.3 m. de largo y 0.7 m. de profundidad, a estas medidas se le adiciona 15 cm. a cada lado para la colocación del ladrillo. La zanja excavada tiene una pendiente de 0.5 %, lo cual nos sirve para la circulación y conductividad del agua residual.
- Para la construcción del humedal el primer paso es hacer el solado, el cual cubre todo el espacio de la zanja excavada, el espesor del solado es de 10 cm., siempre considerando la pendiente. Para tener un mejor resultado se tuvo que impermeabilizar el concreto, con eso evitamos la filtración del agua residual hacia el subsuelo.
- Una vez que el solado ha secado, se procedió a colocar los ladrillos en todo el perímetro del humedal.

- Después de que los ladrillos fueron asentados a una profundidad de 0.7 m., se tarrajeo los muros con concreto, a esta mezcla se le adicionó el impermeabilizante para evitar que el agua residual almacenada en el humedal filtre por las muros, después del tarrajeo, se pulió los muros para dar un mejor acabado.
- Se construyó dos cajas de registro, uno a la entrada y otro a la salida del humedal artificial, la dimensión de cada caja es 0.26 m. de ancho, 0.41 m. de largo y 0.52 m. de profundidad, la finalidad de estas cajas es que en ella se podrá medir los caudales de ingreso y salida, también se podrá tomar con facilidad las muestras para analizarlas en laboratorio.
- Se realizaron todas las instalaciones de las tuberías para dar funcionamiento al humedal, de la red principal de desagüe se captó el agua residual y se llevó hasta la caja de registro con una tubería PVC SAP de 4", de la caja de registro sale hasta el humedal con tubería PVC SAP de 4" con reducción a 2", de ahí se distribuye en todo lo ancho del humedal con una TEE para desagüe.  
El agua residual tratada sale del humedal artificial con una tubería PVC SAP DE 2", llega a la caja de registro y de ahí sale hacia el cuerpo receptor con una tubería PVC SAP DE 2".

➤ **Selección del medio de soporte del humedal artificial:**

Para tener una mayor eficiencia del sistema, se optó por trabajar con filtros en el fondo del humedal artificial, esto se hizo con el propósito de regular la conductividad hidráulica del agua y agregar un medio de soporte para el crecimiento de microorganismos que ayudan a la depuración del agua residual. El material filtrante fue seleccionado por su conductividad hidráulica que para nuestro caso es de  $10,000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ , siendo la arena y la grava media, las seleccionadas.

Estos materiales fueron colocados por capas en todo el área del humedal, la primera capa es de piedra de 2" de diámetro con una altura de 0.1 m., la segunda capa es de piedra chancada de ½" de diámetro con una altura de 0.1 m. y la tercera capa es de arena fina con una altura de 0.2 m.

➤ **Selección de las especies acuáticas:**

Se recolectó la especie *Eichhornia crassipes* conocido comúnmente como jacintos de agua, estas especies se encontraron en una laguna de pesca ubicada cerca al puerto de Tahuishco, estas especies fueron extraídas de las orillas de la laguna, tratando de seleccionar los brotes más tiernos y en buenas condiciones, la altura mínima que deben tener estas especies es de 0.7 m., si son más pequeñas no logran adaptarse a las características de las aguas residuales y mueren a las pocas semanas.

- **Siembra**

Después de haber extraído los jacintos de agua de su hábitat natural, fueron llevados al humedal artificial y colocados en forma ordenada en todo el área del humedal, dejando ciertos espacios para facilitar el crecimiento de los jacintos, una vez colocados se espera que esta especie se adapte al medio para que cumplan su función de depuración de las aguas residuales.

➤ **Evaluación del humedal artificial:**

La evaluación del humedal artificial aplicados en la depuración de aguas residuales, se basó en la caracterización fisicoquímica y microbiológica.

- **Toma de muestras.**

Para la toma de muestra se seleccionó 4 puntos de muestreo, el primero es en la caja de entrada del humedal, el segundo en el centro del humedal, el tercer punto en la salida superior del humedal (a 20 cm de profundidad) y el cuarto punto en la salida inferior del humedal (a 60 cm de P. dentro del sustrato). La caracterización del agua residual se realizó una vez por mes durante cuatro meses. El muestreo fue desarrollado durante el mes de agosto (10 días después de haber sembrado los

jacintos), setiembre (35 días después), octubre (64 días después) y noviembre (93 días después) del 2014.

- **Recolección y análisis de muestras**

Se tomaron muestras simples y la cantidad de muestra recolectada fue de 500 ml por punto de muestreo.

La empresa privada Anaquímicos dedicada a la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual se encargó de analizar los 6 parámetros estudiados: Temperatura, pH, Turbiedad, Sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub> y Coliformes fecales.

- **Métodos de análisis**

La metodología empleada en los análisis del agua residual para cada parámetro establecido en la investigación se especifica a continuación:

Cuadro N° 03:

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Nº	PARAMETRO	UNIDAD	METODOLOGÍA
1	Temperatura	°C	Método por termómetro de mercurio
2	pH	Unidad pH	Método de Potenciométrico
3	Turbiedad	UNT	Método Nefelométrico
4	Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	Método por Espectrofotométrico
5	DBO <sub>5</sub>	mg/l	Método de Electrodo de Membrana
6	Coliformes Fecales	UFC/100ml	Filtración por Membrana al Vacío

Fuente: Elaboración propia

\* UFC/100 mL: Unidades Formadoras de Colonias en 100 ml

## 2.5 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los resultados obtenidos de la investigación serán procesados en cuadros y gráficos, y la interpretación de los datos se hará de forma descriptiva. Para el análisis de la eficiencia del humedal artificial se utilizará la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Eficiencia en remoción} = \frac{\text{concentración}_{\text{entrada}} - \text{concentración}_{\text{salida}}}{\text{Concentración}_{\text{entrada}}} \times 100$$

Las concentraciones de contaminantes del efluente del humedal artificial durante los cuatro meses de experimentación serán comparadas con los valores de los “Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales”.

## CAPITULO III: RESULTADOS

### 3.1 Resultados

#### 3.1.1 Análisis de los principales parámetros del agua residual doméstica:

##### 3.1.1.1 Resultados del tratamiento a 20 cm de profundidad:

###### ➤ Datos obtenidos de la primera caracterización del agua residual:

Después de 10 días de haber sembrado los jacintos de agua se realizó la primera caracterización del agua residual. Para la presente investigación se optó evaluar 6 parámetros que son: turbiedad, pH, temperatura, sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub> y coliformes fecales; la toma se muestra se hizo en la entrada, en el centro y en la salida del humedal artificial. Los datos se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 04

Análisis de parámetros – Primer mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo		
		Entrada al humedal	Centro del humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	73.0	68.0	60
pH	Potencial de Hidrogeno	6.20	6.60	6.97
T°	°C	22.7	22.8	22.75
S.S.T.	mg/L	193.0	180.0	108.0
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	253.0	239.0	185.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5320.0	3752.0	1950.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

La turbiedad del agua residual ingresa con 73 UNT y sale con 60 UNT, la T° mantiene valores de 22 °C, los SST ingresa con 193 mg/L y se reduce en la salida a 108 mg/L, para el DBO<sub>5</sub> la concentración en la entrada es de 253 mg/L y en la salida es de 185 mg/L y en caso de los coliformes fecales el valor de entrada es de 5320 UFC/100mL y en la salida es de 1950 UFC/100mL.

➤ **Datos obtenidos de la segunda caracterización del agua residual:**

El segundo análisis fue tomado después de 35 días de haber sembrado los jacintos, en esta fecha las plantas ya estaban adaptadas al medio, por tanto los datos de la salida son menores a comparación del primer análisis. Los resultados están descritos en el siguiente cuadro.

Cuadro N° 05

Análisis de parámetros – Segundo mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo		
		Entrada al humedal	Centro del humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	88.0	79.4	30.2
pH	Potencial de Hidrogeno	6.12	6.55	6.97
T°	°C	22.5	22.7	22.68
S.S.T.	mg/L	195.0	176.0	122.0
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	232.0	195.0	98.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5613.0	3128.0	1432.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

La turbiedad en la entrada del humedal es de 88 UNT y en la salida la concentración se reduce a 30.2 UNT, para los SST el valor de entrada es de 195 mg/L y en la salida es de 122 mg/L, el DBO<sub>5</sub>

ingresa con 232 mg/L y se reduce a 98 mg/L y para los coliformes fecales de 5613 baja a 1432 UFC/100 mL.

➤ **Datos obtenidos de la tercera caracterización del agua residual:**

Los jacintos han sufrido algunos daños en su morfología, ya que la composición del agua residual es muy fuerte, ocasionado así, la muerte de alguna de ellas, por lo que he optado cambiar nuevos brotes pero con raíces y hojas más grandes que las anteriores.

Para el tercer análisis, los resultados que arroja la caracterización nos indica valores mucho menores en comparación con los meses anteriores, lo cual demuestra que el cambio de brotes de jacintos ha sido beneficioso para el tratamiento ya que lograron adaptarse al medio. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 06

Análisis de parámetros – Tercer mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo		
		Entrada al humedal	Centro del humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	82.0	75.2	19.0
pH	Potencial de Hidrogeno	6.50	6.50	7.15
T°	°C	22.6	22.7	22.80
S.S.T.	mg/L	185.0	174.0	90.2
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	248.0	201.0	45.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5415.0	3282.0	1012.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

La turbiedad del agua residual ingresa con 82 UNT y sale con 19 UNT, los SST ingresa con 185 mg/L y se reduce en la salida a 90.2 mg/L, para el DBO<sub>5</sub> la concentración en la entrada es de 248 mg/L y



en la salida es de 45 mg/L y en caso de los coliformes fecales el valor de entrada es de 5415 UFC/100mL y en la salida es de 1012 UFC/100mL.

➤ **Datos obtenidos de la cuarta caracterización del agua residual:**

A casi 4 meses que empezó el funcionamiento del sistema, la caracterización nos muestra concentración de salida sin mucho incremento en comparación con el tercer análisis, concluyendo que el sistema empieza a estabilizarse manteniendo una eficiencia que no presenta variaciones considerables, conforme transcurre el periodo de supervivencia de los jacintos de agua. Los datos se muestran a continuación:

Cuadro N° 07

Análisis de parámetros – Cuarto mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo		
		Entrada al humedal	Centro del humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	80.0	76.0	21.0
pH	Potencial de Hidrogeno	6.90	6.50	7.24
T°	°C	22.9	22.3	22.60
S.S.T.	mg/L	188.0	175.0	82.0
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	250.0	218.0	40.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5402.0	3401.0	983.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

La turbiedad en la entrada del humedal es de 80 UNT y en la salida la concentración se reduce a 21 UNT, para los SST el valor de entrada es de 188 mg/L y en la salida es de 82 mg/L, el DBO<sub>5</sub> ingresa con 250 mg/L y se reduce a 40 mg/L y para los coliformes fecales de 5402 baja a 983 UFC/100 mL.

### 3.1.1.2 Resultados del tratamiento a 60 cm de profundidad:

#### ➤ Datos obtenidos de la primera caracterización del agua residual:

En el fondo del humedal artificial se colocó un medio de soporte de grava y arena, en este sustrato hay fijación de microorganismos que ayudan a la depuración de las aguas residuales, el resultado nos arroja valores mucho menores en comparación con los resultados a 20 cm de profundidad.

Los resultados se describirán en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 08  
Análisis de parámetros – Primer mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo	
		Entrada al humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	73.0	18.0
pH	Potencial de Hidrogeno	6.20	7.10
T°	°C	22.7	22.9
S.S.T.	mg/L	193.0	50.0
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	253.0	95.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5320.0	743.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

En la entrada del humedal la turbiedad es de 73 UNT y en la salida la concentración baja a 18 UNT, en caso de los SST ingresa con 193 mg/L y después de ser filtrada se reduce a 50 mg/L, el DBO<sub>5</sub> en la entrada es de 253 mg/L y en la salida de 95 mg/L, y en caso de los coliformes fecales entra con 5320 y sale con 743 UFC/100 mL.

➤ **Datos obtenidos de la segunda caracterización del agua residual:**

Los datos obtenidos en la segunda caracterización del agua residual filtrada a 35 días de funcionamiento, nos muestran valores menores en comparación con el primer análisis, estos datos se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 09  
Análisis de parámetros – Segundo mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo	
		Entrada al humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	88.0	12.1
pH	Potencial de Hidrogeno	6.12	7.12
T°	°C	22.5	22.8
S.S.T.	mg/L	195.0	55.0
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	232.0	62.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5613.0	645.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

La turbiedad del agua residual ingresa con 88 UNT y sale con 12.1 UNT, los SST ingresa con 195 mg/L y se reduce en la salida a 55 mg/L, para el DBO<sub>5</sub> la concentración en la entrada es de 232 mg/L y en la salida es de 62 mg/L y en caso de los coliformes fecales el valor de entrada es de 5613 UFC/100mL y en la salida es de 645 UFC/100mL.

➤ **Datos obtenidos de la tercera caracterización del agua residual:**

Los datos fueron tomados a 64 días de haber arrancado el funcionamiento del sistema y se describen en el siguiente cuadro.

Cuadro N° 10

Análisis de parámetros – Tercer mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo	
		Entrada al humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	82.0	7.56
pH	Potencial de Hidrogeno	6.50	7.27
T°	°C	22.6	22.95
S.S.T.	mg/L	185.0	39.12
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	248.0	32.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5415.0	609.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

La turbiedad del agua residual ingresa con 82 UNT y sale con 7.56 UNT, los SST ingresa con 185 mg/L y se reduce en la salida a 39.12 mg/L, para el DBO<sub>5</sub> la concentración en la entrada es de 248 mg/L y en la salida es de 32 mg/L y en caso de los coliformes fecales el valor en la entrada es de 5415 UFC/100mL y en la salida es de 609 UFC/100mL.

➤ **Datos obtenidos de la cuarta caracterización del agua residual:**

En la cuarta caracterización, los valores obtenidos no tienen variaciones significativas en comparación con el tercer análisis.

Los datos se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro N° 11

Análisis de parámetros –Cuarto mes

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo	
		Entrada al humedal	Salida del humedal
Turbiedad	U.N.T.	80.0	5.20
pH	Potencial de Hidrogeno	6.90	7.26
T°	°C	22.9	22.75
S.S.T.	mg/L	188.0	30.10
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	250.0	25.0
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5402.0	549.0

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

La turbiedad en la entrada del humedal es de 80 UNT y en la salida la concentración se reduce a 5.20 UNT, para los SST el valor de entrada es de 188 mg/L y en la salida es de 30.10 mg/L, el DBO<sub>5</sub> ingresa con 250 mg/L y se reduce a 25 mg/L y para los coliformes fecales de 5402 baja a 549 UFC/100 mL.

### 3.1.2 Evaluación de la eficiencia del humedal artificial aplicando la especie *Eichhornia crassipes*:

#### 3.1.2.1 Eficiencia del humedal artificial a 20 cm de profundidad:

Para evaluar la eficiencia del sistema se aplicó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Efici. en remoción} = \frac{\text{concentración}_{\text{entrada}} - \text{concentración}_{\text{salida}}}{\text{Concentración}_{\text{entrada}}} \times 100$$

La concentración de entrada y salida durante los cuatro meses que se realizó la caracterización se muestra en el cuadro N° 4, 5, 6 y 7, con estos datos calculamos el porcentaje de remoción que se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro N° 12  
Eficiencia del humedal a 20 cm de profundidad

Parámetro	Unidad	1° Análisis	2° Análisis	3° Análisis	4° Análisis
		% Remoción	% Remoción	% Remoción	% Remoción
Turbiedad	U.N.T.	17.81	65.68	76.83	73.75
pH	Potencial de Hidrogeno	-12.42	-13.89	-17.21	-4.93
T°	°C	-0.22	-0.80	-0.88	1.44
S.S.T.	mg/L	44.04	37.44	51.24	56.38
D.B.O.	mg/L	26.88	57.76	81.85	84.00
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	63.35	74.49	81.31	81.80

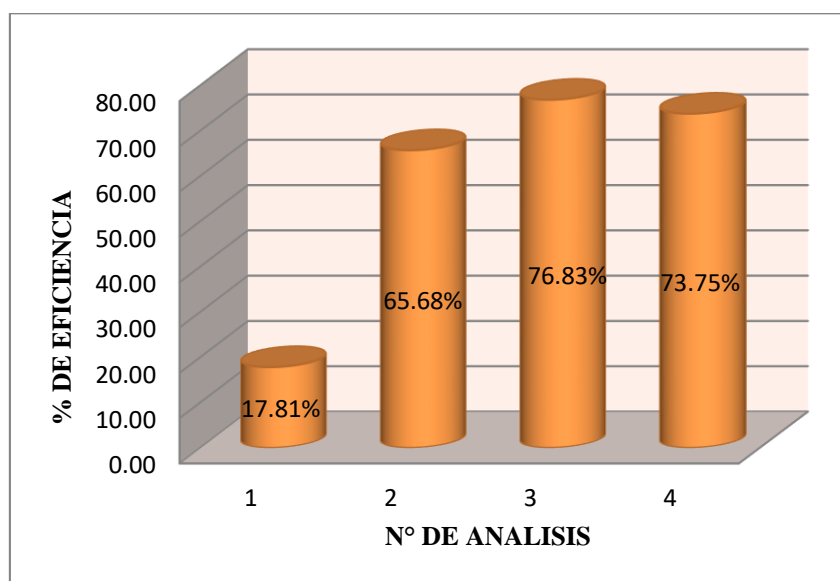
Fuente: Elaboración Propia / Ficha Técnica

Con los datos que muestra el cuadro N° 12, se hizo la representación gráfica de los siguientes parámetros:

- *Eficiencia de Remoción de Turbiedad:*

Como se aprecia en el gráfico 01, la remoción de la turbiedad en el primer mes arranca con el 17.81%, para el segundo mes hay un descenso de casi 49% logrando solo un porcentaje del 66%, para el tercer mes la remoción llega al 76.83% y para el cuarto mes la máxima eficiencia del sistema llega al 73.75% de remoción de turbiedad.

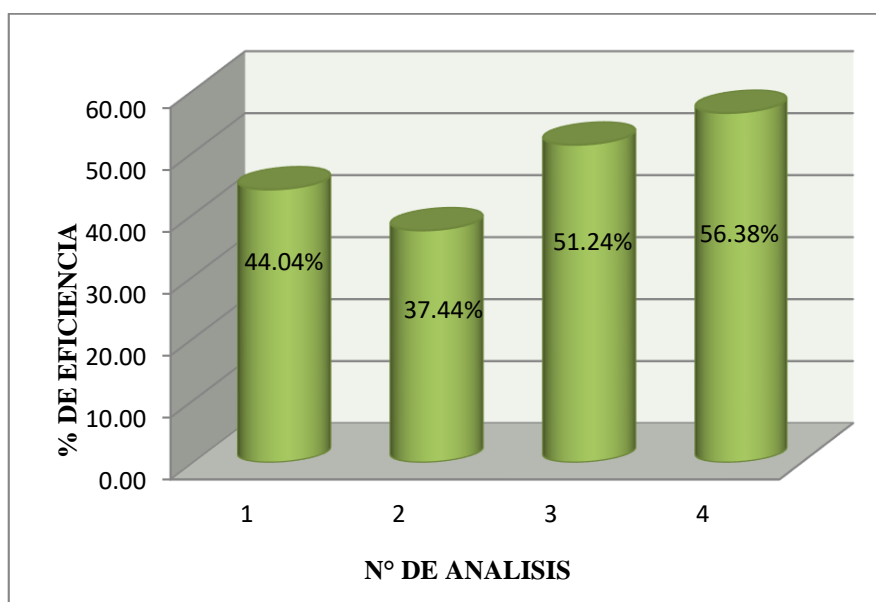
Gráfico N° 01  
Remoción de Turbiedad



Fuente: Cuadro N° 12

- Eficiencia de Remoción de Sólidos Suspendidos Totales:

Gráfico N° 02  
Remoción de Sólidos Suspendidos Totales



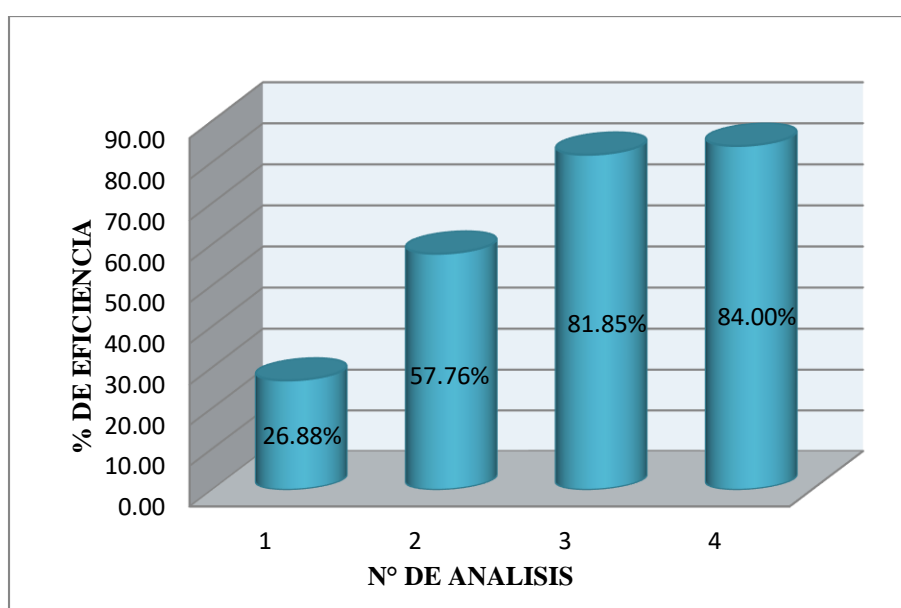
Fuente: Cuadro N° 12

Como se aprecia en el gráfico 02, la remoción de los S.S.T. en el primer mes arranca con el 44% de remoción, para el segundo mes hay un descenso de casi 7% logrando solo un porcentaje del 37.44%, para el tercer mes la remoción aumenta en un 14%, alcanzando remover el 51.24% y para el cuarto mes la máxima eficiencia del sistema llega al 56.38% de remoción de S.S.T.

- Eficiencia de Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO<sub>5</sub>:

Gráfico N° 03

Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno



Fuente: Cuadro N° 12

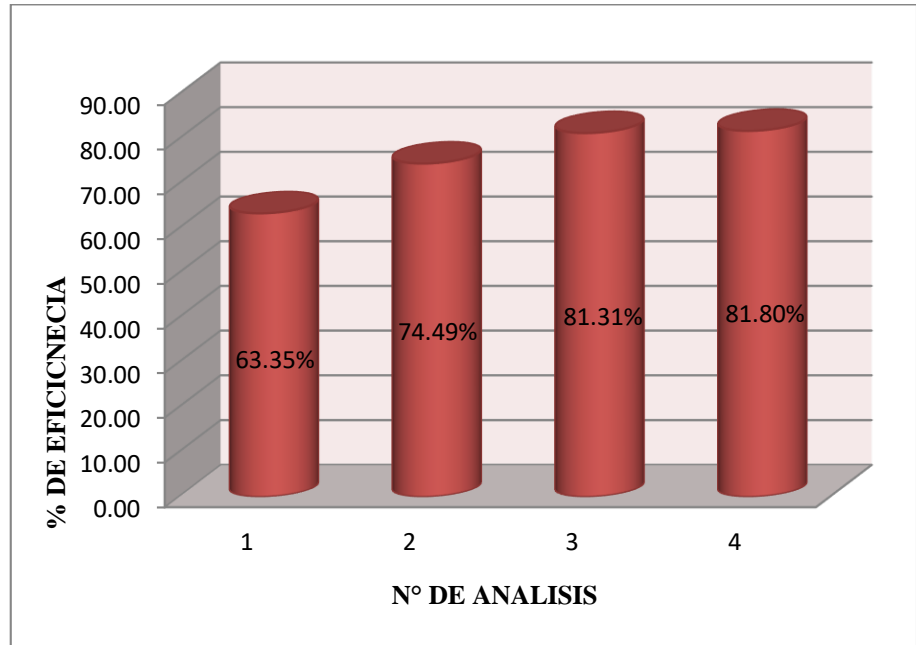
La remoción del DBO<sub>5</sub> es progresiva durante los cuatro meses en que se realizó el análisis, en el primer mes la remoción alcanza el 26.88%, para el segundo mes se incrementa un 31% alcanzando remover un 57.76% de DBO<sub>5</sub>, en el tercer mes el porcentaje de remoción llega a un 81.85% y sin mucha diferencia en el cuarto mes la máxima eficiencia es del 84%.



- Eficiencia de Remoción de Coliformes Fecales:

Gráfico N° 04

Remoción de Coliformes Fecales



Fuente: Cuadro N° 12

La remoción de coliformes fecales en el primer mes arranca con un porcentaje de 63.35%, en el segundo mes la remoción crece un 11% logrando remover el 74.49% de coliformes fecales presentes en el agua residual, para el tercer mes hay un aumento de 6% alcanzado una eficiencia de remoción de 81.31% y para el cuarto mes la eficiencia es de 81.80%.

### 3.1.2.2 Eficiencia del humedal artificial a 60 cm de profundidad:

Para evaluar la eficiencia del sistema a 60 cm de profundidad se calculó el porcentaje de remoción de los cuatro análisis del agua residual aplicando la fórmula descrita anteriormente.

Cuadro N° 13  
Eficiencia del humedal a 60 cm de profundidad

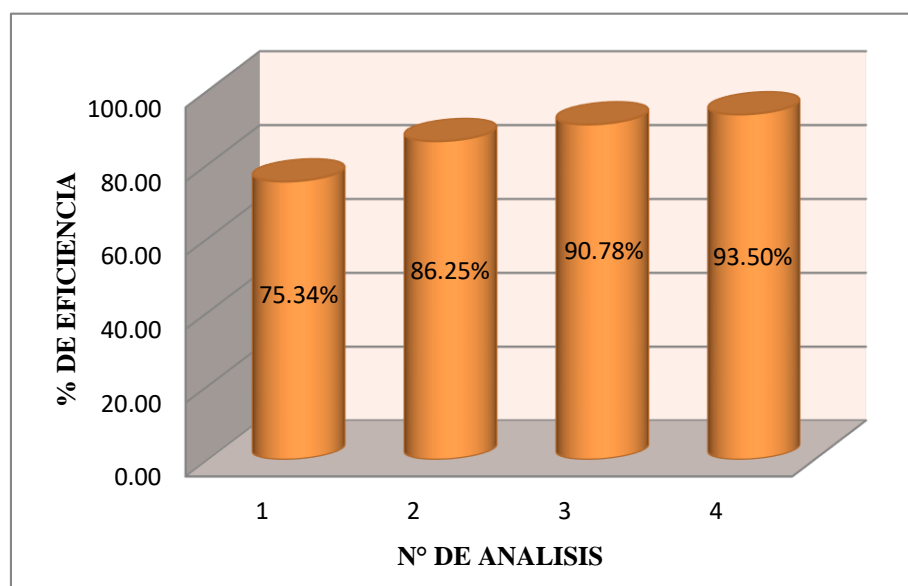
Parámetro	Unidad	1° Análisis	2° Análisis	3° Análisis	4° Análisis
		% Remoción	% Remoción	% Remoción	% Remoción
Turbiedad	U.N.T.	75.34	86.25	90.78	93.50
pH	Potencial de Hidrogeno	-14.52	-16.34	-19.18	-5.22
T°	°C	-0.88	-1.42	-1.55	0.78
S.S.T.	mg/L	74.09	71.79	78.85	83.99
D.B.O.	mg/L	62.45	73.28	87.10	90.00
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	86.03	88.51	88.75	89.84

Fuente: Elaboración Propia/ Ficha Técnica

Con los datos que muestra el cuadro N° 13, se hizo la representación gráfica de los siguientes parámetros:

- Eficiencia de Remoción de Turbiedad:

Gráfico N° 05  
Remoción de Turbiedad

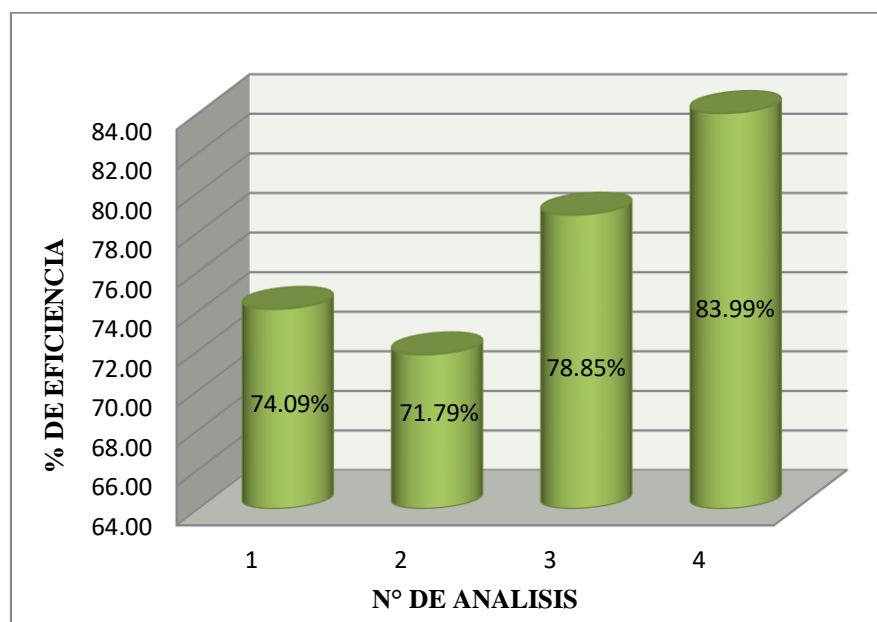


Fuente: Cuadro N° 13

La remoción de la turbiedad en el primer mes arranca con un porcentaje de 75.34%, en el segundo mes la remoción crece un 11% logrando remover el 86.25% de la turbiedad del agua residual, para el tercer mes se alcanza una eficiencia de remoción de 90.78% y para el cuarto mes la eficiencia es de 93.50%.

- Eficiencia de Remoción de Sólidos Suspendidos Totales:

Gráfico N° 06  
Remoción de Sólidos Suspendidos Totales



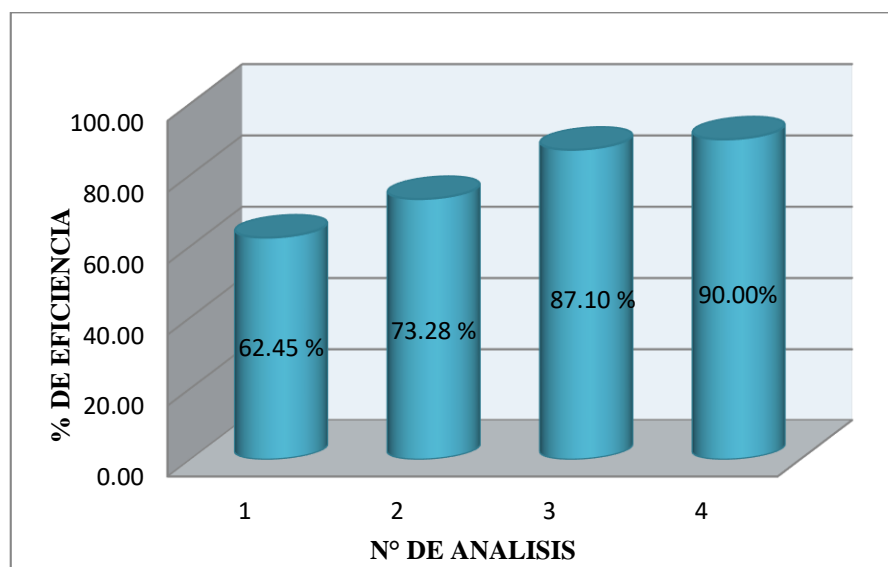
Fuente: Cuadro N° 13

La remoción de los S.S.T. a 60 cm de profundidad en el humedal artificial arranca con el 74.09% de remoción en el primer mes, en el segundo mes se ha logrado remover el 71.79%, para el tercer mes la remoción llega a un 78.85%, y en el cuarto mes la remoción aumenta un 5% logrando una eficiencia de 84%.

- Eficiencia de Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno  $DBO_5$ :

Gráfico N° 07

Remoción la Demanda Bioquímica de Oxígeno



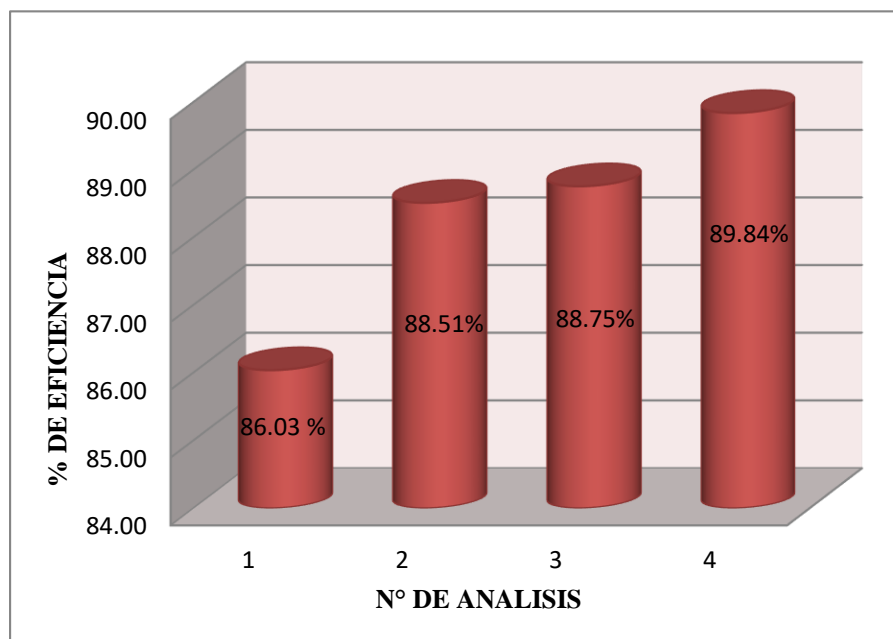
Fuente: Cuadro N° 13

La remoción del  $DBO_5$  en la primera caracterización del agua residual llega a un 62.45%, eficiencia alcanzada en los primeros 10 días de arranque del sistema, para el segundo mes de análisis la remoción alcanza el 73.28%, cifra que aumenta en un 14% para el tercer mes, logrando remover el 87.10% de la materia orgánica y en el cuarto mes la máxima eficiencia es de 90%.

- Eficiencia de Remoción de Coliformes Fecales:

La remoción de coliformes fecales en el primer mes arranca con un porcentaje de 86.03%, en el segundo mes la remoción se incrementa 2% logrando remover el 88.51% de coliformes fecales presentes en el agua residual, para el tercer mes hay una eficiencia de remoción de 88.75% y en el cuarto mes el sistema alcanza su máxima eficiencia logrando remover el 90% de coliformes fecales.

Gráfico N° 08  
Remoción la Coliformes Fecales



Fuente: Cuadro N° 13

### 3.1.3 Comparación del efluente del humedal artificial con los LMP para PTAR:

#### 3.1.3.1 Valores del efluente a 20 cm de profundidad:

Para analizar si un sistema de tratamiento está depurando los contaminantes presentes en el agua residual, los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica debe cumplir con los Límites Máximos Permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de fuentes domesticas según D.S. N°003-2010-MINAN.

En el siguiente cuadro se presentan los datos del afluyente y efluente del humedal artificial del último mes que se realizó el muestreo y los compararemos con los LMP para analizar si cumplen con la norma establecida.

Cuadro N° 14

Comparación del efluente del humedal con los LMP a 20 cm de P.

Parámetro	Unidad	Afluente	Efluente	LMP para PTAR
Turbiedad	U.N.T.	80.0	21.0	-
pH	Potencial de Hidrogeno	6.90	7.24	6.5 - 8.5
T°	°C	22.9	22.60	< 35
S.S.T.	mg/L	188.0	82.0	150
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	250.0	40.0	100
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5402.0	983.0	10,000

Fuente: Elaboración propia/ Ficha Técnica

La evaluación de la turbiedad no está comprendida dentro de los LMP, pero si es un parámetro importante para determinar la calidad del agua, el pH está dentro del rango 6.5 – 8.5. La temperatura apropiada para el crecimiento óptimo de los jacintos es de 20 – 30 °C y durante los cuatro meses que se realizó el análisis la T° llega a los 23°, tanto en el afluente como en el efluente. Para el caso de los S.S.T. los resultados del efluente muestran valores inferiores a los 150 mg/L, pero los datos del afluente presentan valores de 188 mg/L.

Para el DBO<sub>5</sub>, los valores del afluente sobrepasa los 100 mg/L, registrando valores de 250 mg/L, pero después de aplicar el tratamiento de humedales artificiales con los jacintos de agua, disminuye considerablemente la materia orgánica logrando resultados de hasta 40 mg/L, valores inferiores a lo dispuesto en el LMP.

Como nos indica los LMP los coliformes fecales presentes en los efluentes de plantas de tratamiento son permisibles hasta 10,000 Unidades Formadoras de Colonias sobre 100 mililitros de solución, en este caso, el afluente y efluente del humedal artificial presentan valores mucho menores a lo que permite la norma.

Con estos datos podemos afirmar que la hipótesis planteada en la presente investigación es válida, ya que, mediante el humedal artificial utilizando la especie *Eichhornia crassipes* (jacintos de agua) si se puede recuperar las aguas residuales domésticas.

### 3.1.3.2 Valores del efluente a 60 cm de profundidad:

Los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica debe cumplir con los Límites Máximos Permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de fuentes domesticas según D.S. N°003-2010-MINAN.

En el siguiente cuadro se presentan los datos del afluente y efluente del humedal artificial a 60 cm de profundidad y los compararemos con los LMP para analizar si cumplen con la norma establecida.

Cuadro N° 15

Comparación del efluente del humedal con los LMP a 60 cm de P.

Parámetro	Unidad	Afluente	Efluente	LMP para PTAR
Turbiedad	U.N.T.	80.0	5.20	-
pH	Potencial de Hidrogeno	6.90	7.26	6.5 - 8.5
T°	°C	22.9	22.75	< 35
S.S.T.	mg/L	188.0	30.10	150
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	250.0	25.0	100
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	5402.0	549.0	10,000

Fuente: Elaboración propia / Ficha Técnica

El pH está dentro del rango de 6.5 – 8.5 en el afluente y efluente del humedal en los cuatro meses de análisis. La temperatura es determinante para el crecimiento y adaptación de los jacintos de agua

en el humedal artificial, es por ello que la T° llega a 22° menor a los 35° que permite la norma. Para el caso de los S.S.T. el valor de entrada es de 188 mg/L y el de salida es menor a 31 mg/L.

El humedal artificial a 60 cm de profundidad logra remover hasta un 90% del DBO<sub>5</sub> presente en el agua residual, el afluente presenta concentraciones de 250 mg/L y después del tratamiento la concentración de la materia orgánica en el efluente se reduce a 25 mg/L.

Como nos indica los LMP los coliformes fecales presentes en los efluentes de plantas de tratamiento son permisibles hasta 10,000 Unidades Formadoras de Colonias en 100 mililitros de muestra, en este caso, el afluente presenta valores de 5402 UFC/100 mL y el efluente del humedal artificial a 60 cm de profundidad presentan valores que apenas alcanza los 550 UFC/100 mL.

Analizando los datos que nos muestra la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual proveniente de la Urbanización Las Flores, podemos afirmar que, mediante el humedal artificial si se puede recuperar las aguas residuales domésticas, por tanto la hipótesis es verdadera.

Los humedales artificiales están constituidos por dos partes fundamentales, la primera por especies acuáticas que para nuestro caso es la *Eichhornia crassipes* y la segunda por el sustrato o filtro de grava y arena. Ambas partes aportan un potencial significativo en la depuración de las aguas residuales domésticas. Es por ello, que la eficiencia del sistema en conjunto alcanza entre el 70 y 90% de remoción de los contaminantes estudiados en la presente investigación.



## 3.2 Discusiones

### 3.2.1 Análisis de parámetros del agua residual:

Para la caracterización del agua residual tanto a la entrada y a la salida del humedal artificial, se optó por analizar seis parámetros físicoquímico y microbiológico: turbiedad, temperatura, pH, sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub> y coliformes fecales. Estos parámetros fueron seleccionados según lo establecido en los Límites Máximos Permisibles para efluentes de planta de tratamiento de aguas residuales. Para García, Diego (2006), los parámetros estudiados en su investigación solo era el DBO<sub>5</sub> y los SST, el primer parámetro indica la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos presentes en las raíces de los jacintos de agua para degradar la materia orgánica del agua residual y los SST es medido para comprobar la eficiencia del sistema a 60 cm de profundidad. Sin embargo; Osnaya, Maricarmen (2012), incluyo en su tesis el estudio de los coliformes fecales y del DBO<sub>5</sub>. Los parámetros que se van a analizar es dependiendo del criterio del investigador, pero según los antecedentes de investigación hay que considerar el análisis del DBO<sub>5</sub>.

### 3.2.2 Eficiencia del humedal artificial aplicando la especie *Eichhornia crassipes*:

Para remover los contaminantes presentes en el agua residual de la Urb. Las Flores se utilizó la especie *Eichhornia crassipes* conocido comúnmente como jacinto de agua, esta planta se adapta perfecto a los cambios de temperatura característico de la ciudad de Moyobamba, la temperatura promedio en la que se desarrolló la especie durante los cuatro meses que duró la investigación está comprendida dentro de 21 y 23 °C. Lo contrario de García, Diego (2006), la temperatura óptima para el crecimiento de jacintos dentro del humedal oscila entre los 25 y 30 °C, fuera de este rango las plantas sufrieron daños en su morfología.

Fernández, Jesús (2004). En los resultados de la caracterización del agua residual durante el desarrollo experimental del proyecto piloto ubicado en el aeropuerto de Madrid – Barajas utilizando especies flotantes, el afluente muestra

concentraciones de 175 mg/L de DBO<sub>5</sub> y 47 UFC/100 mL de coliformes fecales, y en el efluente el DBO<sub>5</sub> llega a 26 mg/L y los coliformes fecales a 2 UFC/100 mL, logrando un porcentaje de remoción de 85 % para DBO<sub>5</sub> y 96 % para coliformes fecales. La eficiencia de remoción de contaminantes en comparación con esta investigación es mayor debido al comportamiento del agua residual y a la extensa superficie de macrofitas empleadas para el tratamiento.

Durante el estudio de la especie *Eichhornia crassipes*, el humedal artificial en el cuarto mes llegó a su máxima eficiencia logrando afluentes con concentraciones de 250 mg/L de DBO<sub>5</sub> y 5402 UFC/100 mL de coliformes fecales y el efluente reduce su composición a 40 mg/L de DBO<sub>5</sub> y 983 UFC/100 mL de coliformes fecales, alcanzando una eficiencia de remoción de 81.85% de DBO<sub>5</sub> y 81.31% de coliformes fecales. La depuración del efluente es posible porque la planta transfiere el oxígeno a las raíces, la presencia de tallos y raíces en el humedal artificial genera el crecimiento de la película microbiana, los microorganismos toman el carbono orgánico y los nutrientes del agua residual.

En la investigación de Osnaya, Maricarmen (2012), los efluentes de la Universidad de la Sierra de Juárez en México tienen concentraciones de 149.3 mg/L de DBO<sub>5</sub>, alcanzando una eficiencia de remoción de 62%, la temperatura en la cual crecieron las especies flotantes está por debajo de los 20°C, durante los 5 meses de estudio, la temperatura no influyó en el crecimiento y adaptación de las especies, concluyendo que la *Eichhornia crassipes* puede adaptarse a los distintos cambios de temperatura sin perjudicar la eficiencia de remoción de contaminantes en los humedales.

Los humedales artificiales utilizando macrofitas ya sea flotantes, enraizadas o emergentes, tienen rendimientos que superan el 50% de remoción de contaminantes. Arias, Sergio (2010), demuestra en su investigación que los efluentes del Centro de Recursos Naturales Renovables La Salada tienen concentraciones de DBO<sub>5</sub> que llegan a 116 mg/L, logrando remover el 68% de la materia orgánica, en su proyecto piloto trabaja con 10 especies distintas entre flotantes, enraizadas y emergentes, y el porcentaje de remoción en los destinos tratamientos superan el 65% de remoción para DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes fecales.

En el fondo del humedal artificial se colocó un sustrato de grava y arena para complementar la investigación, el sustrato regula la conductividad hidráulica del agua y es un medio de soporte para el crecimiento de microorganismos, en el sustrato se producen muchas transformaciones físicas y biológicas y hace posible el almacenamiento de contaminantes. La acumulación de restos de vegetación de los jacintos de agua aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal, esta materia facilita la fijación de microorganismos el cual consume el oxígeno disponible en el humedal, todo este proceso se da para remover los contaminantes del agua residual. El efluente de este tratamiento presenta concentraciones de 32 mg/L de DBO<sub>5</sub>, logrando una eficiencia de remoción de la materia orgánica de 87.10%, para los sólidos suspendidos totales el valor es de 39 mg/L, alcanzando una eficiencia del 79%. A diferencia de García, Diego (2006); el efluente del humedal con filtro de grava y arena remueve un 35% de S.S.T., eficiencia relativamente baja, en caso del DBO<sub>5</sub> las concentraciones de salida se acerca a 90 mg/L, logrando una eficiencia de remoción de 61%.

### **3.2.3 Comparación de los valores del efluente del humedal artificial con los valores de los LMP para efluentes de PTAR:**

Los resultados obtenidos del análisis, fueron comparados con los LMP para evaluar si el sistema está cumpliendo con los valores establecidos. Durante los cuatro meses de análisis los valores están por debajo de lo dispuesto en la norma, por tanto, el humedal artificial está cumpliendo su función de depurar las aguas residuales de la Urb. Las Flores. Este sistema se puede considerar técnicamente rentable para el tratamiento de las aguas residuales, ya que se desarrolla de una forma natural y económica, con un gasto mínimo de energía y un mantenimiento relativamente sencillo.

### 3.3 Conclusiones

- Durante la etapa de caracterización fisicoquímica y microbiología del agua residual proveniente de la Urb. Las Flores, la temperatura oscila entre 21 y 23°C el cual hace propicio el crecimiento de la *Eichhornia crassipes*, la turbiedad del efluente del humedal varía entre 5 y 32 UNT, dependiendo del comportamiento del agua y las condiciones climáticas, el DBO<sub>5</sub> de salida llega a bajar hasta 25 mg/L, en cuanto a los coliformes fecales los valores son reducidos hasta 550 UFC/100 mL y para los sólidos suspendidos totales los valores se alternan entre 30 y 100 mg/L.
- El comportamiento de la *Eichhornia crassipes* se asocia a la facultad que poseen sus raíces de crear una comunidad bacteriana que metaboliza el nitrógeno y el carbono orgánico, esta característica facilita la eliminación de contaminantes en el agua residual, a 20 cm de profundidad del humedal la eficiencia de remoción para el DBO<sub>5</sub> llega a 84%, en caso de los coliformes fecales la eficiencia alcanza el 82% y para los SST la eficiencia es de 56%. El medio filtrante aumenta la eficiencia del sistema, es por ello, que a 60 cm de profundidad el porcentaje de remoción del DBO<sub>5</sub> llega al 90%, los coliformes fecales logran removerse hasta un 90% y los SST supera una eficiencia de remoción del 83%.
- Los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico y microbiológico del agua residual, durante los cuatro meses que se realizó la investigación, están por debajo de los valores establecidos en los LMP según la norma peruana, por tanto, estos sistemas pueden ser aplicados como unidades avanzadas de tratamiento en pequeñas ciudades, siempre teniendo en consideración el dimensionamiento hidráulico y las especificaciones técnicas.

### 3.4 Recomendaciones

- Los humedales artificiales deben ser controlados y evaluados periódicamente para observar las condiciones generales del sitio y para descubrir cambios importantes que puedan ser adversos, como deslizamientos, crecimiento de vegetación indeseable o proliferación de vectores.
- Los humedales artificiales son una buena alternativa para la depuración de las aguas residuales, pues los costos de construcción, operación y mantenimiento son bajos, estos sistemas puedan aplicarse en cualquiera zona del Perú, siempre y cuando la vegetación utilizada sea de la zona para que pueda adaptarse a las condiciones climáticas y garantizar la eficiencia del sistema.
- Cuando el sistema de tratamiento está basado en macrofitas flotantes el flujo del humedal es superficial, por ello se recomienda, utilizar filtros de grava y arena pues este sustituye al medio de soporte propio de los humedales de flujo subsuperficial, aumentando la eficiencia del mismo.
- La composición del agua residual tiene concentraciones fuertes de contaminantes, el cual perjudica el crecimiento de la especie *Eichhornia crassipes*, por ello, hay que supervisar la vegetación constantemente para evaluar su salud y abundancia, hay que podar las hojas dañadas para evitar que se sature el humedal con los brotes muertos.
- Se recomienda que para futuras investigaciones se deben estudiar en detalle todos los procesos que ocurren entre las raíces, el agua residual, los microorganismos y el material filtrante, para tener una visión compleja de los procesos que llegan a depurar los contaminantes del agua residual.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❖ Arias, Sergio y otros (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Informe técnico (Colombia)*, Vol. 74, 12-22.
- ❖ Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. (Proyecto HUMEDAL). Cochabamba, Bolivia: Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón.
- ❖ Estrada, Islena (2010). *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales*. Documento presentado como requisito para optar el título de Tecnóloga Química, Escuela de Química, Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- ❖ Fernández, J., Beascochea, E., Muñoz, J. & Fernández, M. (2004). *Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- ❖ García, Diego y Leal, Dianna (2006). *Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del parque nacional natural Amacayacu – Amazonas*. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.
- ❖ García, Pablo y otros (2009). *Habitantes del agua. Macrófitos*. España: Agencia Andaluza del Agua.
- ❖ Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación*. México: McGRAW - HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO, S.A.
- ❖ Lara, Jaime (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

- ❖ Llagas, Wilmer & Guadalupe, Enrique (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 15, N° 17, 85-96.
  
- ❖ Lovera D., Quipuzco L. & Laureano G. (2006). *Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la Comunidad Urbana de Lacabamba, Región Ancash, Perú; usando tecnología de humedales artificiales*. Disponible en: [slideshare.net/janetross/humedales-artificiales-en-lacabamba](http://slideshare.net/janetross/humedales-artificiales-en-lacabamba).
  
- ❖ Martínez, Sergio & Rodríguez, Miriam (2005). *Tratamiento de aguas residuales con MATLAB*. Barcelona: Reverté.
  
- ❖ Ministerio del Ambiente (2010, Marzo 17). Límite Máximo Permisible para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales doméstica o municipales. *El Peruano*.
  
- ❖ Montero, José (2007). *Estadística descriptiva*. España: International Thomson Ediciones Paraninfo, S.A.
  
- ❖ Osnaya, Maricarmen (2012). *Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez*. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ciencias Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.
  
- ❖ Pérez, Antonio y otros (2005). *Contaminación Ambiental: Una visión desde la Química*. Burgos, España: Thomson Ediciones Paraninfo, S.A.
  
- ❖ Rojas, José (2005). *Diversidad bacteriana en el perifiton de raíces de Eichhornia sp., Pistia sp., y Azolla sp., en un humedal artificial de la Universidad Earth*. Informe de trabajo final de graduación. Escuela de Biología, Instituto tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
  
- ❖ Romalho, Rubens (2005). *Tratamiento de aguas residuales*. Canadá: Editorial Reverté S.A.

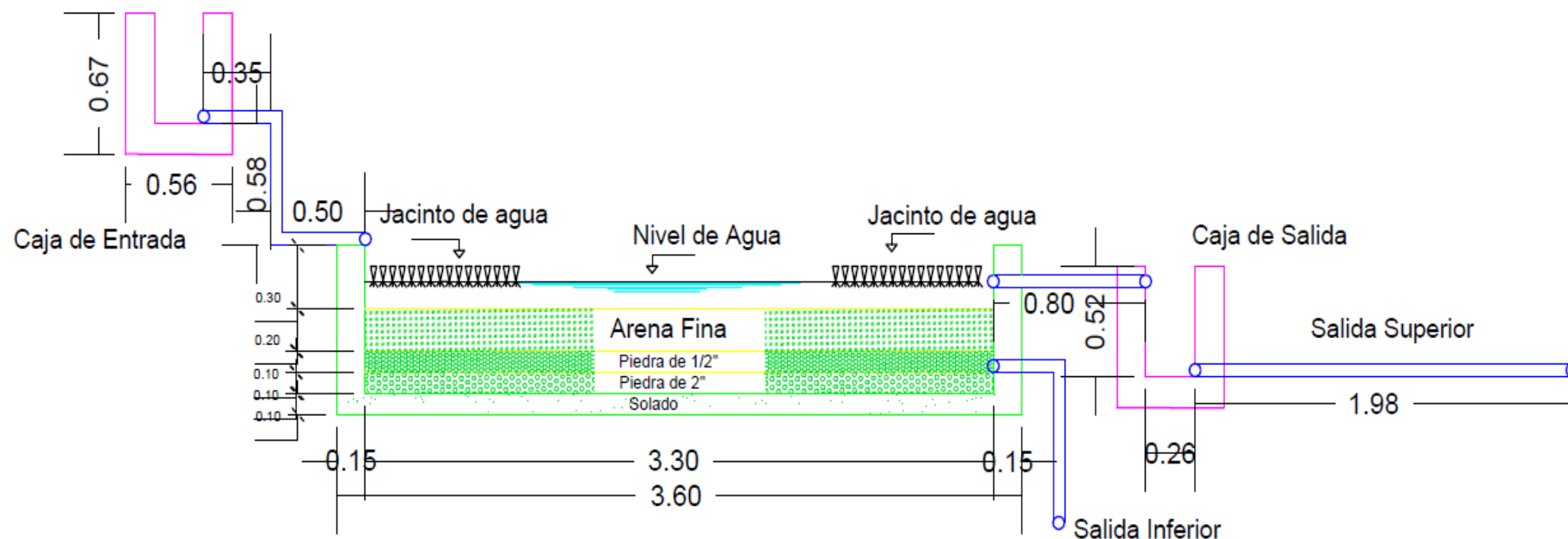
- ❖ Romero, Jairo (2001). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
  
- ❖ Romero, Mariana y otros (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, Vol. 25, N° 03.
  
- ❖ Rossi, María. (2010). *Oportunidades de mejoras ambientales por el tratamiento de aguas residuales en el Perú*. Lima: Fondo Nacional del Ambiente.
  
- ❖ Russell, David L. (2012). *Tratamiento de aguas residuales: un enfoque práctico*. Barcelona: Reverté.
  
- ❖ Villafranca, Blanca (2009). *Diseño y evaluación de la implementación de un humedal artificial como sistema de tratamiento de las aguas residuales del colegio “Toni Real Vincens” en el AAHH El Milagro-Huanchaco, La Libertad*. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.



**MELISSA FLORES SALDAÑA**

# **ANEXOS**





CORTE A - A  
HUMEDAL ARTIFICIAL



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTIN - T  
FACULTAD DE ECOLOGIA  
E.A.P. INGENIERIA SANITARIA

Título de Tesis:

"APLICACION DE HUMEDAL ARTIFICIAL CON MACROFITAS  
FLOTANTES EN LA RECUPERACION DE LAS AGUAS  
RESIDUALES DOMESTICAS, MOYOBAMBA - SAN MARTIN"

Autora:

MELISSA FLORES SALDAÑA

Lámina:

**P - 02**

Plano:

CORTE A - A

Fecha:

Diciembre  
2014



**FOTO N° 1: LIMPIEZA DEL TERRENO**



**FOTO N° 2: EXCAVACIÓN DE ZANJA**



**FOTO N° 3: MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (ARENA Y HORMIGÓN)**





**FOTO N° 4: PREPARACIÓN DEL CONCRETO PARA SOLADO**



**FOTO N° 5: LLENADO DE LA ZANJA CON CONCRETO**



**FOTO N° 6: VERIFICACIÓN DEL SOLADO**



**FOTO N° 7: PULIDO Y ACABADO DEL SOLADO**



**FOTO N° 8: ASENTADO DE LA PRIMERA FILA DE LADRILLOS**



**FOTO N° 9: VISTA GENERAL DEL ASENTADO DE LADRILLOS DE LA PRIMERA FILA**





**FOTO N° 10: ASENTADO DE LADRILLOS HASTA UNA ALTURA DE 0.7 M DE ALTURA.**



**FOTO N° 11: IMPERMEABILIZACIÓN DEL ÁREA INTERNA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL.**



**FOTO N° 12: PULIDO Y ACABADO FINAL DEL HUMEDAL.**



**FOTO N° 13: CONSTRUCCIÓN Y ACABADO DE LA CAJA DE REGISTRO.**



**FOTO N° 14: INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE 4" DE PVC.**



**FOTO N° 15: CONEXIÓN DE TUBERÍA DE ENTRADA AL HUMEDAL ARTIFICIAL.**





**FOTO N° 16: EMPALME DE LA TUBERÍA DE SALIDA DE 2" A LA CAJA DE REGISTRO.**



**FOTO N°17: LLENADO DEL FILTRO DE GRAVA Y ARENA EN EL FONDO DEL HUMEDAL.**



**FOTO N° 18: RECOLECCIÓN DE LOS JACINTOS DE AGUA.**





**FOTO N° 19: SIEMBRA DE LOS JACINTOS EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL.**



**FOTO N° 20: REEMPLAZO DE BROTES CON RAÍCES Y HOJAS MÁS GRANDES**



**FOTO N° 21: PRIMER PUNTO DE MUESTREO TOMADO A LA ENTRADA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL**





**FOTO N° 22: SEGUNDO PUNTO DE MUESTREO TOMADO EN EL CENTRO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL.**



**FOTO N° 23: TERCER PUNTO DE MUESTREO TOMADO A LA SALIDA SUPERIOR DEL HUMEDAL.**



**FOTO N° 24: CUARTO PUNTO DE MUESTREO TOMADO A LA SALIDA DEL HUMEDAL (POR FILTRACIÓN).**



**FOTO N° 25: PRESENTACIÓN DE LA MUESTRAS EN ENVASES ROTULADOS.**



**FOTO N° 26: LIMPIEZA Y CONTROL DE LOS JACINTOS DE AGUA.**



**FOTO N° 27: MEDICIÓN DEL PH EN EL LABORATORIO.**





**FOTO N° 28: MEDICIÓN DE LA TURBIEDAD DEL AGUA RESIDUAL.**



**FOTO N° 29: FILTRACIÓN POR MEMBRANA PARA DETERMINAR COLIFORMES FECALES.**